

**Министерство образования и науки РФ  
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный  
университет»  
Институт экологии и географии**

**Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.**

**Радиационная экология**

Конспект лекций



Казань 2014

**Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.**

Радиационная экология: Конспект лекций/ Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.  
Казанский (Приволжский) федеральный университет. – Казань, 2014. – 112 с.

#### Аннотация

Одним из важнейших абиотических факторов, определяющих развитие жизни на планете, является ионизирующее излучение. Научно-технический прогресс в значительной степени способствовал перераспределению природных радионуклидов в окружающей среде и появлению искусственных радионуклидов, получаемых при ядерных взрывных и на атомных реакторах.

Дисциплина «Радиационная экология» - отрасль экологии, изучающая распределение, миграцию, круговорот радионуклидов в биосфере и воздействие ионизирующего излучения на экологические системы (биоценозы и популяции организмов). Цель курса - изучение студентами механизма воздействия ионизирующей радиации на живые организмы, источников и путей поступления радионуклидов в биосферу, а также принципов и норм радиозэкологического нормирования. В курсе рассмотрены характеристики и особенности основных экологически значимых радионуклидов, а также их поведение в окружающей среде и живых организмах. Отдельные разделы курса посвящены закономерностям накопления радионуклидов в биоте и их миграции в трофических цепях, биоиндикации радиоактивных загрязнений и изменению биологического разнообразия в зонах радиоактивного загрязнения.

Электронная версия курса: <http://zilant.kpfu.ru/course/view.php?id=17267>

Принято на заседании кафедры прикладной экологии

Протокол № 7 от 20.01.2014

© Казанский федеральный университет

© Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.

**Направление подготовки:** 022000.62 «Экология и природопользование», профиль Прикладная экология (бакалавриат, 4 курс, очное обучение)

**Дисциплина:** «Радиационная экология»

**Количество часов:** 108ч. (в том числе: лекции - 26, практические занятия - 36, самостоятельная работа - 46); форма контроля – зачет.

**Темы:** 1. Введение. Предмет и задачи радиоэкологии. Элементы ядерной физики. 2. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом. 3. Механизмы воздействия ионизирующей радиации на организм. 4. Радионуклиды в биосфере. 5. Закономерности накопления радионуклидов в биоте. 6. Типы ядерных реакторов. 7. Принципы и методы радиоэкологического нормирования.

**Ключевые слова:** ионизирующая радиация, радионуклиды, миграция радионуклидов, биологическое действие ионизирующих излучений, ядерные реакторы, радиоактивные отходы, радиоэкологическое нормирование.

**Дата начала эксплуатации:** 12 февраля 2014 года

**Авторы – составители курса:**

Бадрутдинов Олег Рауфович, доцент кафедры прикладной экологии Института экологии и географии КФУ, к.ф.-м.н, Тюменев Рустем Сагитович, снс Института экологии и географии КФУ, к.б.н.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ЛЕКЦИЯ 1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ РАДИОЭКОЛОГИИ. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.</b>	<b>7</b>
Элементы ядерной физики.	10
Радиоактивность.	18
Закон радиоактивного распада.	30
Вопросы и задания.	33
Список литературы.	33
Использованные информационные ресурсы.	33
<b>ЛЕКЦИЯ 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ</b>	
<b>ДОЗИМЕТРИЯ И РАДИОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.</b>	<b>34</b>
Взаимодействие корпускулярных излучений с веществом.	34
Взаимодействие гамма излучения с веществом.	37
Дозиметрия и радиометрия ионизирующих излучений.	42
Единицы измерения радиоактивности.	42
Вопросы и задания.	50
Список литературы.	50
Использованные информационные ресурсы.	50
<b>ЛЕКЦИЯ 3. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.</b>	<b>51</b>
Ионизационная камера.	54
Счетчики Гейгера-Мюллера.	56
Сцинтилляционный метод регистрации излучений.	59
Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений.	61
Фотографический, химический и калориметрический методы регистрации.	62
Методы измерения радиоактивности.	63
Приборы для измерения излучений.	65
Вопросы и задания.	68
Список литературы.	68
Использованные информационные ресурсы.	68
<b>ЛЕКЦИЯ 4. МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА БИООБЪЕКТЫ.</b>	<b>69</b>
Биологическое действие ионизирующих излучений.	74
Первичные (пусковые) механизмы, лучевые реакции.	74
Действие радиации на молекулярные компоненты клетки.	78
Действие радиации на клетку, радиация и ДНК.	84
Механизмы восстановления радиационных повреждений клетки.	92
Радиочувствительность организмов.	95
Модификация радиочувствительности.	97
Вопросы и задания.	102
Список литературы.	102
Использованные информационные ресурсы.	103
<b>ЛЕКЦИЯ 5. ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ.</b>	<b>104</b>
Внутреннее облучение инкорпорированными радиоактивными веществами.	110
Отдаленные последствия облучения.	117
Принципы лечения лучевой болезни.	121
Действие малых доз радиации.	123
Вопросы и задания.	129
Список литературы.	130
Использованные информационные ресурсы.	130
<b>ЛЕКЦИЯ 6. РАДИОНУКЛИДЫ В БИОСФЕРЕ. РАДИОАКТИВНОСТЬ ОБОЛОЧЕК ЗЕМЛИ.</b>	<b>131</b>
Технологически измененный естественный радиационный фон (ТИЕРФ).	138
Радиоактивность атмосферы.	139
Радиоактивность гидросферы.	143
Радиоактивность почв.	155
Радиоактивность растительного и животного мира.	161
Радиоактивность тела человека.	163
Фоновое облучение человека.	167
Радиационные источники загрязнения окружающей среды.	171
Радиационный мутагенез как фактор формирования флоры и фауны.	183
Радиация как фактор формирования органических отложений.	186
Радиация и антропогенез.	188

Вопросы и задания. . . . .	191
Список литературы. . . . .	191
Использованные информационные ресурсы. . . . .	192
<b>ЛЕКЦИЯ 7. ЗАЩИТА ОРГАНИЗМОВ ОТ РАДИАЦИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ.</b> . . . .	193
Защитные мероприятия при авариях на АЭС. . . . .	200
Мероприятия по снижению поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и продукты питания. . . . .	201
Снижение содержания радионуклидов в продукции при ее переработке. . . . .	203
Сельскохозяйственное производство в загрязненных условиях. . . . .	203
Вопросы и задания. . . . .	207
Список литературы. . . . .	208
Использованные информационные ресурсы. . . . .	208
<b>ЛЕКЦИЯ 8. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В БИОТЕ. НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ.</b> . . . .	209
Миграция радионуклидов и их изотопных и неизотопных носителей в трофических цепях основных экосистем. . . . .	211
Особенности аккумуляции радионуклидов различными фитоценозами. . . . .	213
Коэффициенты накопления радионуклидов. . . . .	215
Влияние внешнего облучения и поглощенных радионуклидов на жизнедеятельность растений. . . . .	218
Вопросы и задания. . . . .	219
Список литературы. . . . .	220
Использованные информационные ресурсы. . . . .	220
<b>ЛЕКЦИЯ 9. БИОИНДИКАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ.</b> . . . .	221
Растения – как биоиндикаторы радиоактивных загрязнений. . . . .	222
Грибы – как биоиндикаторы радиоактивных загрязнений. . . . .	223
Почвенные животные как биоиндикаторы радиоактивных загрязнений. . . . .	230
Радиоактивное загрязнение среды и жизнь в почве. . . . .	233
Вопросы и задания. . . . .	235
Список литературы. . . . .	236
Использованные информационные ресурсы. . . . .	236
<b>ЛЕКЦИЯ 10. ТИПЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ.</b> . . . .	237
Ядерный реактор. . . . .	237
Устройство различных типов ядерных реакторов. . . . .	240
Характеристика реакторов ВВЭР, РБМК, на тяжелой воде, с шаровой засыпкой, на быстрых нейтронах. . . . .	240
Основные радиоактивные продукты ядерного деления. . . . .	250
Загрязнение природной среды при эксплуатации АЭС. . . . .	254
Радиоэкологический контроль при снятии АЭС с эксплуатации. . . . .	256
Вопросы и задания. . . . .	262
Список литературы. . . . .	263
Использованные информационные ресурсы. . . . .	263
<b>ЛЕКЦИЯ 11. РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНЫХ АВАРИЙ.</b> . . . .	264
Международная шкала событий на АЭС. . . . .	266
Авария в Три-Майн-Айленде (США). . . . .	268
Авария в Уиндскейле (Англия). . . . .	268
Аварии на Южном Урале (СССР). . . . .	269
Авария на Чернобыльской АЭС. . . . .	282
Радиоактивные отходы на АЭС. . . . .	288
Захоронение радиоактивных отходов. . . . .	291
Вопросы и задания. . . . .	294
Список литературы. . . . .	294
Использованные информационные ресурсы. . . . .	294
<b>ЛЕКЦИЯ 12. ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ. НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.</b> . . . .	295
Основные принципы обеспечения радиационной безопасности. . . . .	295
Нормы радиационной безопасности (НРБ99/2009). . . . .	299
Требования к ограничению техногенного облучения в контролируемых условиях. . . . .	300
Требования к защите от природного облучения в производственных условиях. . . . .	302
Требования к ограничению облучения населения. . . . .	304

Вопросы и задания. . . . .	305
Список литературы. . . . .	306
Использованные информационные ресурсы. . . . .	306
ЛЕКЦИЯ 13. РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ. . . . .	307
Нормирование и организация радиационного контроля при отводе территорий под строительство. . . . .	308
Нормирование и организация радиационного контроля жилых и общественных зданий и сооружений. . . . .	310
Нормирование и организация радиационного контроля радиоактивности строительных материалов. . . . .	315
Обращение с материалами и изделиями, загрязненными или содержащими радионуклиды. . . . .	316
Обращение с радиоактивными отходами. . . . .	318
Критерии вмешательства на загрязненных территориях. . . . .	321
Вопросы и задания. . . . .	323
Список литературы. . . . .	323
Использованные информационные ресурсы. . . . .	324
 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА . . . . .	325
КРАТКИЙ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ . . . . .	326
ПРИЛОЖЕНИ 1 . ТЕМЫ ДЛЯ РЕФЕРАТОВ. . . . .	335
ПРИЛОЖЕНИ 2 . ЗАДАЧИ. . . . .	336
ПРИЛОЖЕНИ 3 . ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ. . . . .	342
ПРИЛОЖЕНИ 4. ТЕСТЫ . . . . .	345
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ . . . . .	353

## Лекция 1.

### Предмет и задачи радиоэкологии. Элементы ядерной физики.

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются цели и задачи радиационной экологии, а также основные понятия и законы физики атомного ядра и элементарных частиц. Изложен ряд общих вопросов касающихся строения и свойств атомного ядра, радиоактивных распадов и ядерных реакций.

**Ключевые слова.** Атом, электронная оболочка атома, изотопах, изомерах, изобарах, ядерные силы, дефект масс, радиоактивность,  $\alpha$ -частицы,  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -кванты, альфа-распад, бета – распад, электронный захват, внутренняя конверсия, закон радиоактивного распада.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи, вопросы к лекции и тесты.

Радиационная экология - отрасль экологии, изучающая распределение, миграцию, круговорот радионуклидов в биосфере и воздействие ионизирующего излучения на экологические системы (биоценозы и популяции организмов).

Радиоэкология, изучающая радиационную обстановку окружающей среды, имеет ряд общих задач с радиационной гигиеной, призванной обеспечить охрану здоровья населения от воздействия ионизирующих излучений. Вопросы охраны окружающей среды приобретают все большее значение в связи с расширением масштабов использования ядерной энергии в мирных целях и проблем, связанных с утилизацией радиоактивных отходов и их возможными экологическими последствиями.

Под влиянием ионизирующего излучения возникают прямые и вторичные эффекты, обусловленные непосредственным его действием на живые организмы, составляющие биоценоз, и изменениями в функционировании биогеоценозов как саморегулирующих систем. В результате различной радиочувствительности разных видов растений и животных облучение природных биоценозов может привести к замене одних видов другими, изменениям внутривидовых и межвидовых отношений. В облучаемых популяциях возникают радиационно-генетические изменения, увеличивается естественный мутационный темп, происходят сдвиги радиорезистентности на популяционном уровне.

В условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды чрезвычайная роль отводится радиационному мониторингу окружающей среды, контролю за уровнем радиации, облучением животных, растений, человека.

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, в науке и медицине.

В отношении всех источников облучения населения следует принимать меры как по снижению дозы облучения у отдельных лиц, так и по уменьшению числа лиц, подвергающихся облучению, в соответствии с принципом оптимизации.

Радиационная безопасность персонала, населения и окружающей природной среды считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности (обоснование, оптимизация, нормирование) и требования радиационной защиты, установленные действующими санитарными правилами.

Для оценки состояния радиационной безопасности используется показатель радиационного риска. В наибольшей степени этот риск характеризует суммарная годовая накопленная эффективная доза от всех источников излучения. Значимость каждого источника излучения следует оценивать по его вкладу в суммарную эффективную дозу.

Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения.

Стратегия защиты населения от природных источников излучения основывается на следующих основных принципах:

- контроль соблюдения установленных ограничений на отдельные природные источники облучения населения (жилые и общественные здания, строительные материалы и территории застройки, фосфорные удобрения и мелиоранты), а также пределов дозы облучения природными источниками излучения критических групп населения в результате обращения с материалами или производственными отходами с повышенным содержанием природных радионуклидов и т.д.

- обследование уровней облучения за счет всех природных источников излучения и выявление критических групп, анализ структуры облучения населения и критических групп, разработка и осуществление в случае необходимости оптимальных защитных мероприятий для снижения дозы облучения населения природными источниками излучения.

- защитные мероприятия планируются для населения с высокими уровнями облучения



и осуществляются в отношении источников, создающих наибольший вклад в суммарную дозу, для которых возможно наибольшее снижение дозы при минимальных экономических затратах.

- ожидаемые негативные социальные (например, ограничение водопотребления) и экономические (ограничение землепользования, использования минерального сырья и т.д.) последствия планируемых защитных мероприятий должны быть минимальными.

Проведение многих мероприятий по снижению облучения населения за счет природных источников приводит к ограничению использования территорий, зданий, сооружений, минерального сырья и строительных материалов, промышленных товаров и изделий, водопотребления, увеличению расходов на строительство и эксплуатацию зданий и пр. В связи с этим программы защитных мероприятий должны обосновываться с учетом принципов обоснования и оптимизации вмешательства на основе взвешивания пользы и вреда от планируемого вмешательства.

Естественные радионуклиды (элементы естественных радиоактивных семейств урана-238 и тория-232, а также калий-40) создают преобладающий вклад (до 70%) в формирование дозы облучения населения и производственного персонала. В Российской Федерации облучение от природных радионуклидов отдельных лиц и персонала любых производств, не связанных с профессиональным использованием источников ионизирующих излучений, регламентируется положениями федеральных законов: «О радиационной безопасности населения», «О санитарно-гигиеническом благополучии населения», «Об охране окружающей среды», и нормативными документами «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009), «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения» (СанПиН 2.6.1.2800-10) в соответствии с которыми установлен предел суммарной эффективной дозы облучения 5 мЗв/год от естественных радионуклидов для персонала любых производств, не связанных с профессиональным использованием источников ионизирующего излучения.

При этом согласно «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности населения» (ОСПОРБ-99/2010) в случае, если в результате обследования в организации не обнаружено случаев превышения дозы облучения работников в 1 мЗв/год, то дальнейший радиационный контроль в ней не является обязательным. Однако при существенных изменениях технологии производства, которые могут привести к увеличению облучения работников, следует провести повторное обследование. В организациях, в которых установлено превышение дозы 1 мЗв/год, но нет превышения дозы в 2 мЗв/год, следует проводить выборочный радиационный контроль рабочих мест с

наибольшими уровнями облучения работников. В организациях, в которых дозы облучения работников превышают 2 мЗв/год, должен, кроме того, осуществляться постоянный контроль доз облучения и проводиться мероприятия по их снижению.

Радиационно-экологические изыскания выполняются для оценки современного состояния и прогноза возможных изменений окружающей природной среды под влиянием антропогенной нагрузки с целью предотвращения, минимизации или ликвидации вредных и нежелательных экологических и связанных с ними социальных, экономических и других последствий и сохранения оптимальных условий жизни населения.

Основными задачами радиозоологического мониторинга состояния окружающей среды являются:

- выявление источников радиационного воздействия (естественной и искусственной природы) на биоту;
- определение контрольных участков и систематическое проведение необходимых дозиметрических, радиометрических и радиохимических исследований различных объектов внешней среды (атмосферного воздуха, воды, почвы, пищевых продуктов и др.) на территориях;
- измерение гамма-фона на контролируемых участках.

От заключений и рекомендаций экологической службы зависит правильность мероприятий, направленных на снижение влияния ионизирующего излучения на экологические системы (биогеоценозы, агроценозы, популяции организмов).

Радиационная безопасность населения достигается путем ограничения воздействия от всех основных видов облучения. Возможности регулирования разных видов облучения существенно различаются, поэтому регламентация их осуществляется отдельно с применением разных методологических подходов и технических способов.

## **Элементы ядерной физики**

### **Строение вещества**

Природа состоит из простых и сложных веществ. К простым веществам относят элементы, к сложным - химические соединения. Мельчайшей частицей химического элемента, являющейся носителем его химических свойств, называется *атомом* (от греческого *atomos* – неделимый). Мельчайшая частица сложного вещества - *молекула*, она состоит из атомов одного или нескольких элементов. В природе только инертные газы обнаруживаются в виде атомов, так как их внешние оболочки замкнуты.

Атом любого элемента можно разделить на элементарные (субатомные) частицы, и в этом случае он утратит свойства, характерные для данного элемента. К элементарным

частицам относят электроны, протоны, нейтроны, мезоны, нейтроны и ряд других. Однако определение "элементарные" не означает, что эти частицы простейшие, бесструктурные, элементы материи. Электрон, например, так же многообразен, как и атом.

Атомы всех элементов, входящих в периодическую систему, состоят из электронов, протонов и нейтронов. Один элемент отличается от другого только числом и расположением этих частиц. В начале XX века было выдвинуто несколько теорий строения атома, которые назывались моделями атома. При помощи моделей ученые пытались объяснить различные физические свойства атомов - линейность спектра излучения газов при высокой температуре, электрическую нейтральность их устойчивость и многие другие явления. В 1911 году Э. Резерфорд предложил планетарную модель атома, которая, более глубоко была развита Н.Бором (1913). Согласно этой модели, в центре атома расположено ядро, имеющее положительный электрический заряд. Вокруг ядра перемещаются по эллиптическим орбитам электроны, образующие электронную оболочку атома. Между орбитами присутствует лишь пространство, являющимся носителем различных физических полей.

*Электронная оболочка атома.* Теоретически, а затем экспериментально установлено, что в зависимости от энергии, которая удерживает электроны вокруг ядра, они группируются на той или иной электронной орбите. Электронные орбиты (уровни, слои) создают оболочку атома. Количество слоев у разных атомов не одинаковое. В атомах с большой атомной массой число орбит достигает семи. Они обозначаются либо цифрами, либо буквами латинского алфавита: K, L, M, N, O, P, Q. Ближайший к ядру – первый слой K. Количество электронов на каждой орбите строго определенное. Так, K- слой имеет не более двух электронов, L- до 8, M- 18, N- 32 электрона и т. д. ( рис. 1).

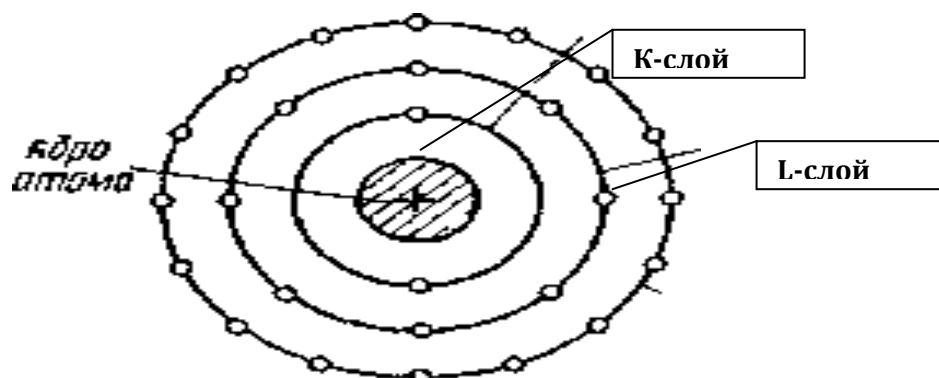


Рис.1. Строение атома.

В такой строгой фиксированной структуре электронных оболочек атомов находит свое отражение квантовая природа всего окружающего нас мира – внутренняя энергия атома или совокупность атомов, объединенных в молекулу, не изменяется непрерывно и не может принимать какие угодно значения.

*Электрон ( $e$ )* – устойчивая элементарная частица с массой покоя (масса покоя – масса частицы, скорость которой равна 0) равной 0,000548 атомной единицы массы (а. е. м). Атомная единица массы – это относительная (безмерная) величина атомной массы. За ее единицу принята  $1/12$  массы изотопа  $^{12}\text{C}$ . Эквивалент 1 а.е.м. составляет 931 МэВ. В абсолютных единицах масса электрона равна  $9,1 \cdot 10^{-28}$  г. Энергетический эквивалент электрона составляет 0,511 МэВ ( $0,000548 \cdot 931 = 0,511$  МэВ). В ядерной физике энергию частиц выражают в электроновольтах (эВ). Электроновольт – энергия, которую приобретает электрон, проходящий в электрическом поле разность потенциалов 1 В. Электрон несет один элементарный отрицательный заряд электричества, т.е. наименьшее количество электричества, встречающегося в природе. Поэтому в ядерной физике он принят за единицу электрических зарядов.

В атоме суммарное количество электронов на орбите всегда равно сумме протонов, находящихся в ядре. Например, атом гелия содержит два протона в ядре и имеет два электрона на орбите, атом натрия – 11 протонов в ядре и 11 электронов на орбитах, атом свинца – 82 протона в ядре и 82 электрона на орбитах и т.д. В силу равенства суммы положительных и отрицательных зарядов атом представляет электрически нейтральную систему.

На каждый из движущихся электронов вокруг ядра действуют две равные противоположные силы: кулоновская сила притягивает электроны к ядру, а равная ей центробежная сила инерции стремится вырвать электрон из атома.

При сообщении электронам извне дополнительной энергии они могут переходить с одного энергетического уровня на другой или даже покидать пределы данного атома. Так если воздействие будет слабее энергии связи электрона с ядром, то электрон перейдет лишь с одного энергетического уровня на другой. Такой атом остается нейтральным, однако он отличается от других атомов этого химического элемента избытком энергии. Атомы, обладающие избытком энергии, называются *возбужденными*, а сам процесс *возбуждением*.

При сильных электрических воздействиях электроны вырываются из атома и удаляются за его пределы. Атом, лишившись одного или нескольких электронов, превращается в *положительный ион*, а присоединивший к себе один или несколько электронов в *отрицательный ион*. Следовательно, на каждый положительный ион

образуется один отрицательный, т.е. возникает пара ионов. Процесс образования ионов из нейтральных атомов называется *ионизацией*. Атом в состоянии иона существует чрезвычайно короткий промежуток времени. Свободное место на орбите положительного иона заполняется свободным электроном, и атом вновь становится электрически нейтральной системой. Этот процесс носит название *рекомбинацией ионов* (деионизации) и сопровождается выделением энергии в виде излучения.

Переход из одного состояния в другое происходит скачкообразно с излучением или поглощением строго фиксированной порции энергии – *кванта*. Этот термин ввел в науку в XX в основоположник квантовой теории немецкий физик Макс Планк. Слово «квант» на немецком языке означает «количество» и происходит от латинского «quantum» - сколько.

Таким образом, с положением электронов в электронной оболочке связан ряд свойств атома: возбуждение, ионизация и излучение энергии. Процесс ионизации атомов имеет важное значение в практике обнаружения и дозиметрии излучений, а также для понимания биологического действия ионизирующей радиации.

### **Строение ядра**

Ядро атома состоит из двух типов частиц: протонов и нейтронов, связанных между собой огромными силами. Протоны и нейтроны имеют общее название нуклоны (ядерная частица от греч. nucleus – ядро); в ядре они могут превращаться друг в друга.

*Протон (p)* - устойчивая ядерная частица с массой равной 1,00758 а.е.м., которая примерно в 1840-раз больше массы электрона, что в абсолютном выражении составляет  $1,6725 \cdot 10^{-24}$  г. Протон имеет один элементарный положительный заряд, равный заряду электрона. Атом водорода представляет собой ядро, содержащее один протон, вокруг которого вращается один электрон. Если удалить этот электрон, оставшаяся часть атома будет являться протоном, в связи этим протон определяют как ядро атома водорода.

Каждый атом любого элемента содержит в ядре определенное число протонов, которое является постоянным и определяет физические и химические свойства элемента. Так в ядре атома серебра 47 протонов, в ядре урана 92. Количество протонов в ядре называется атомным номером или зарядовым числом  $Z$ , оно соответствует порядковому номеру элементов в таблице Д. И. Менделеева.

*Нейтрон (n)* - электрически нейтральная частица, масса которой составляет 1,00898 а.е.м. Нейтрон сам по себе нестабилен. Находясь в свободном состоянии, он испускает электрон и антинейтрино и превращается в протон. Вследствие своей электрической нейтральности нейтрон не отклоняется под действием магнитного поля, не отталкивается

атомным ядром и, следовательно, обладает большой проникающей способностью, что создает серьезную опасность как фактор биологического действия излучения.

Нейтроны, находящиеся в ядре дают в основном только физическую характеристику элемента, так как в разных ядрах одного и того же химического элемента, может быть не одинаковое количество нейтронов. В ядрах легких устойчивых элементов число протонов и нейтронов относятся друг к другу, как 1:1. Чем дальше расположен элемент в таблице Д. И. Менделеева (начиная с 21-го элемента – скандия), тем больше в его атомах число нейтронов по сравнению с протонами. Для самых тяжелых ядер число нейтронов в 1,6 раза больше числа протонов. Например, ядро урана-238 содержит 92 протона и 146 нейтронов (238 – число нуклонов).

В настоящее время массы атомов измерены с большой точностью (до шестого и седьмого десятичного знаков) с помощью современных масс-спектрометров.

Диаметр ядра атома равен примерно  $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  см и составляет 0,0001 диаметра всего атома. Однако практически вся масса атома (99,95 - 99,98%) сосредоточена в его ядре. Рассчитано, что если бы удалось получить 1 см<sup>3</sup> чистого ядерного вещества, то оно бы весило 100-200 млн. т. Масса электронной оболочки незначительна, поэтому масса ядра почти полностью совпадает с массой атома. Сумма протонов и нейтронов в ядре называется *массовым числом* и обозначается буквой *A*. Число нейтронов *N* в ядре равно разности между массовым числом и атомным номером элемента  $N = A - Z$ .

При обозначении атомов обычно пользуются символами элементов, которым принадлежит атом, и указывают слева сверху массовое число, а внизу - порядковый номер в форме индекса, где *X* - символ элемента. Например, ядро атома натрия  $^{23}_{11}\text{Na}$  имеет 23 нуклона, из них 11 протонов и 12 нейтронов, ядро углерода  $^{12}_6\text{C}$  содержит 12 нуклонов, из них 6 протонов и т.д. Порядковый, номер иногда опускают, так как символ элемента вполне определяет его место в периодической системе.

### **Понятие об изотопах, изомерах, изобарах**

Большинство химических элементов в природе представляет собой определенные смеси атомов с разным числом нейтронов в их ядрах.

Атомы, однотипные по количеству протонов (с одинаковым зарядом, но различные по числу нейтронов, называются *изотопами* (isos – одинаковый, topos – место). Такие элементы имеют идентичный номер в таблице Д.И. Менделеева, но разное массовое число. Поскольку заряды этих атомов одинаковые, электронные оболочки их имеют почти равнозначное строение, а атомы с такими ядрами чрезвычайно близки по химическим

свойствам и спектрам. Большинство (71 из 90) природных элементов представляет собой смесь 2 - 10 изотопов.

При помощи ядерных реакций удастся получить у каждого химического элемента еще по несколько радиоактивных (неустойчивых) изотопов. В настоящее время известно около 300 стабильных изотопов, а количество нестабильных и радиоактивных ядер превосходит 1500.

Атомы элемента с одинаковым массовым числом, но ядра которых находятся в различном энергетическом состоянии, называют *изомерами*. Они обладают разным периодом полураспада ( $T$ ), энергией и видом излучения (например,  $^{80}_{35}\text{Br}$  с  $T = 18$  мин, и  $^{80}_{35}\text{Br}$  с  $T = 4,4$  ч;  $^{60}_{27}\text{Co}$  с  $T = 5,3$  год. и  $^{60}_{27}\text{Co}$  с  $T = 10,7$  мин). Про изомер с избытком энергии говорят, что он находится в *метастабильном* состоянии. Символически такое состояние обозначают латинской буквой « $m$ », поставленной рядом с массовым числом ( $^{80m}\text{Br}$ ). Отдавая излишек энергии, метастабильный изомер совершает изомерный переход в основное состояние.

В природе существуют атомные ядра разных элементов с одинаковым массовым числом, но с различным атомным номером. Такие атомы называют *изобарами* (например,  $^{40}_{18}\text{Ar}$ ,  $^{40}_{19}\text{K}$ ,  $^{40}_{20}\text{Ca}$ ).

### Ядерные силы, дефект масс

Если ядра атомов состоят только из протонов и нейтронов, то, как объяснить устойчивость этих ядер? Казалось бы, что по закону Кулона одноименно заряженные протоны, отталкиваясь, друг от друга должны были бы разлететься в разные стороны. Однако в действительности ядра атомов очень прочные образования. Следовательно, внутри ядра должны действовать большие силы сцепления как между протонами и нейтронами, так и между одноименными частицами. Расчеты показывают, что это не могут быть гравитационные силы, действующие в соответствии с законом всемирного тяготения, так как их величина во много раз меньше сил электрического отталкивания протонов. В таком случае, ядерные силы представляют собой новый вид сил, природа которых изучена пока недостаточно. Считается, что наиболее вероятно ядерные силы возникают в процессе непрерывного обмена между нуклонами и особыми частицами (квантами ядерного поля), которые называются пи-мезонами или пионами. Ядерные силы – короткодействующие силы. Они значительны только на очень малых расстояниях, сопоставимых с диаметром самого ядра. С увеличением расстояния между ядерными частицами ядерные силы становятся практически равными нулю.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, т.е. каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится существенное количество протонов и нейтронов. Например, в состав самого тяжелого из существующих в природе атомных ядер – урана-238 92 протона и 146 нейтронов.

Чтобы разделить на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, необходимо совершить работу, т.е. затратить энергию. Эта энергия называется *энергией связи ядра*. При образовании ядра из нуклонов выделяется энергия связи. Если рассчитать массу ядра атома гелия по формуле:

$$m_{\text{я}} = m_p N_p + m_n N_n, \text{ где}$$

$m_p$  – масса протона,  $N_p$  – количество протонов,  $m_n$  – масса нейтрона,  $N_n$  – количество нейтронов, то она будет равна:

$$m_{\text{я}} = 1,0076 \cdot 2 + 1,0089 \cdot 2 = 4,033 \text{ а.е.м.}$$

Масса ядра гелия равна 4,003 а.е.м. Таким образом, масса ядра гелия оказывается меньше массы своих составных частей, взятых в отдельности на 0,03 а.е.м. В этом случае говорят, что ядро имеет дефект массы (недостаток массы). Разница между массой ядра расчетной и массой ядра фактической называется *дефектом массы* ( $\Delta m$ ).  $\Delta m = m_{\text{я рас}} - m_{\text{я факт}}$ .

Дефект массы показывает, насколько прочно связаны частицы в ядре, а также, сколько выделилось энергии при образовании ядра из отдельных нуклонов. Этот расчет можно провести на основании уравнения А. Эйнштейна взаимосвязи между массой и энергией:

$$E = mc^2, \text{ где}$$

$E$  – энергия в эргах;  $m$  – масса в г;  $c$  – скорость света, равная  $3 \cdot 10^{10}$  см/с.

В соответствии с этим законом масса и энергия представляют собой разные формы одного и того же явления. Ни масса, ни энергия не исчезают, а при соответствующих условиях переходят из одного вида в другой, т.е. любому изменению массы  $\Delta m$  системы соответствует эквивалентное изменение энергии  $\Delta E = \Delta mc^2$ .

Используя это уравнение можно подсчитать энергию, которая выделяется при образовании ядра атома гелия из отдельных нуклонов:

$$\Delta E = 0,03 \cdot 1,6725 \cdot 10^{-24} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ эрг.}$$

Как отмечалось выше, в ядерной физике за единицу энергии принят электронвольт, следовательно, энергию связи ядра можно выразить в электронвольтах, исходя из того, что 1 а.е.м. эквивалентна 931 МэВ:



$$\Delta E = 0,03 \cdot 931 = 27,93 \text{ МэВ} \approx 28 \text{ МэВ}.$$

Если бы существовал способ разделения ядра атома гелия на 2 протона и 2 нейтрона, то для этого потребовалось затратить не менее 28 МэВ энергии.

Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, *называется удельной энергией связи*. Для гелия она составляет  $28:4 = 7$  МэВ. Следовательно, зная дефект массы, можно легко вычислить энергию связи ядра. Энергия связи ядра соразмерно возрастает с увеличением числа нуклонов, однако нестрого пропорционально их числу. Например, энергия связи ядра дейтерия составляет 2,2 МэВ, азота – 104,56, а урана – 1800 МэВ. Если не считать самых легких ядер (дейтерий, тритий), то энергия связи на один нуклон составляет для всех ядер около 8 МэВ.

Для сравнения стоит напомнить, что химическая энергия связи атомов в молекулах в расчете на один атом равна нескольким электроновольтам (2-5 эВ). Данный факт объясняет, почему ядерные реакции характеризуются в миллион раз большими энергиями, чем обычные химические реакции, а закон взаимосвязи массы и энергии показывает откуда возникает та колоссальная энергия, которая образуется при синтезе и делении ядер.

Таким образом, атомное ядро является сгустком очень плотного, несжимаемого, положительно заряженного вещества, называемого ядерной материей. В межъядерных процессах этот сгусток может переходить в возбужденное состояние: нагреваться, вращаться, испытывать колебания, подобные колебаниям капли жидкости, и даже разрываться на части, если энергия возбуждения достаточно велика. Разрыв надвое называется делением ядра. Это самое сложное ядерное превращение и по сути самое важное, потому что на нем основана ядерная энергетика. Поскольку в атомном ядре средняя энергия связи на нуклон зависит от атомной массы  $A$  и ее максимум приходится на ядра средней массы, в принципе существует две возможности получения ядерной энергии: слияние легких ядер (синтез) и деление тяжелых. Синтезу препятствует электростатическое отталкивание ядер, так что он возможен лишь для ядер с минимальным зарядом – изотопов водорода (дейтерия и трития) и только при очень высоких температурах – около сотни миллионов градусов. Реакция деления, напротив, достаточно легко осуществима при поглощении нейтрона тяжелыми ядрами, прежде всего изотопом урана-235. При делении ядра урана на два осколка происходит испускание двух или трех нейтронов. Вскоре после открытия деления ядер была осуществлена цепная самоподдерживающаяся реакция деления урана нейтронами, использованная позже для создания ядерного оружия и получения энергии в мирных целях.

Атомное ядро является очень сложным объектом для теоретического описания. Во-первых, нет исчерпывающих данных о природе ядерных сил, определяющих свойства ядер. Во-вторых, атомное ядро включает в себя от нескольких десятков до одной или двух сотен частиц. Это слишком много для точного решения уравнений квантовой механики, но мало для применения вероятностных, статистических методов, практикуемых в теории газов или твердых тел. Поэтому при изучении свойств атомного ядра прибегают к разнообразным упрощенным моделям, каждый из которых используется для описания ограниченного круга ядерных реакций и процессов. Одна из них модель - жидкой капли, упомянутая выше. Существует также т. н. оболочная модель, рассматривающая движение нуклонов по орбитам, которое подобно движению электронов в атоме. Однако в этом случае отдельного центра притяжения нет, каждый нуклон движется в «самосогласованном» поле, создаваемом отдельными нуклонами. Эти два способа жидкокапельный и оболочный - могут показаться противоречащими друг другу, но следует учитывать, что атомное ядро, являясь объектом микромира, подчиняется законам не ньютоновской, а квантовой механики. Согласно квантовой механике, нуклоны, образующие ядро, проявляют сложные свойства и в одних случаях ведут себя как частицы, в других - как волны. Ядро в целом также может вести себя в разных случаях и как капля и как система независимых частиц.

Раздел науки, посвященный изучению атомного ядра, называется ядерной физикой, и основным методом экспериментального исследования здесь является изучение ядерных реакций под действием заряженных частиц, нейтронов, гамма-квантов, получаемых на ускорителях или в ядерных реакторах.

### **Радиоактивность**

Радиоактивность – это свойство ядер определенных элементов самопроизвольно (без внешних воздействий) превращаться в ядра других элементов с испусканием особого рода излучения, называемого *радиоактивным излучением*. Само явление называется *радиоактивным распадом*. Радиоактивность является исключительно свойством ядра атома и зависит только от его внутреннего состояния. Нельзя повлиять на течение процесса радиоактивного распада, не изменяя состояния атомного ядра. На скорость радиоактивных превращений не оказывают изменения температуры, давления, наличие электрического и магнитного полей, вид химического соединения радиоактивного элемента и его агрегатное состояние.

Радиоактивные явления, происходящие в природе, называют *естественной радиоактивностью*; аналогичные процессы, происходящие в искусственно полученных радиоактивных веществах (через соответствующие ядерные реакции), - *искусственной*

радиоактивностью. Однако деление это носит условный характер, так как оба вида радиоактивности подчиняются одним и тем же законам.

### Характеристики радиоактивных излучений

Радиоактивное излучение невидимо. Оно обнаруживается с помощью различных явлений, происходящих при его взаимодействии с веществом.

Было установлено, что радиоактивное излучение в поперечно-магнитном поле разделяется на три пучка, которые были названы первыми буквами греческого алфавита –  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Лучи, отклоняющиеся к отрицательно заряженной пластинке, условно были названы *альфа-лучами*; отклоняющееся к положительно заряженной пластинке, – *бета-лучами*, а лучи не отклоняющиеся в магнитном поле – *гамма-лучами* (рис.2). Разделение радиоактивного излучения в магнитном поле позволило установить, что только гамма-лучи являются истинными лучами, поскольку они не отклоняются ни в сильном электрическом, ни в магнитном полях. Альфа- и бета- лучи представляют собой заряженные частицы, поскольку меняют свое направление в вышеуказанных полях.

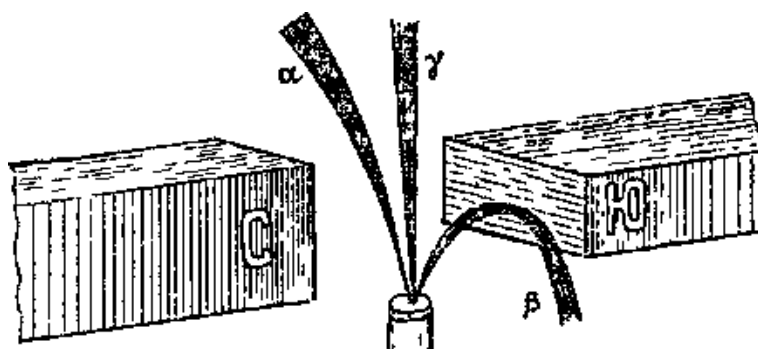


Рис.2. Разделение радиоактивных лучей в магнитном поле.

*Альфа-лучи ( $\alpha$ -частицы).* Представляют собой ядра атомов гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ), испускаемые некоторыми радиоактивными элементами и движущиеся со скоростью 20000 км/с. Они состоят из двух протонов и двух нейтронов; имеют двойной положительный заряд и большую массу, равную 4,003 а.е.м. Эти частицы превышают массу электрона в 7300 раз; энергия их колеблется в пределах 2-11 МэВ. Для каждого данного изотопа энергия альфа-частиц постоянна. Пробег альфа частиц в воздухе составляет в зависимости от энергии 2 – 10 см, в биологических тканях – несколько десятков микрон. Так как альфа частицы массивны и обладают сравнительно большой энергией, путь их в веществе прямолинеен; они вызывают сильно выраженный эффект ионизации и флуоресценции. В воздухе на 1 см пути альфа частица образует 100 – 250 тыс. пар ионов. Длина пробега в других веществах

может быть легко вычислена, исходя из того, что тормозная способность вещества, отнесенная к одному атому, пропорциональна квадратному корню из атомного веса.

Ионизация, производимая альфа-лучами, обуславливает ряд особенностей в тех химических реакциях, которые протекают в веществе, в частности в биологической ткани (образование сильных окислителей, свободного водорода и кислорода и др.) Эти радиохимические реакции, протекающие в биологических тканях под воздействием альфа-лучей, вызывают большую, чем у других видов ионизирующих излучений, биологическую эффективность. Поэтому альфа-излучающие радиоактивные изотопы при попадании в организм крайне опасны для человека и животных. Вся энергия альфа-частиц передается клеткам и поражает их.

*Бета-лучи ( $\beta$ -частицы).* Это поток электронов или позитронов (элементарная частица, подобная электрону, но с положительным зарядом), испускаемых при бета-распаде. Физическая характеристика электронов ядерного происхождения (масса, заряд), такая же, как и у электронов атомной оболочки. Бета частица обозначается символом  $\beta^-$  (электронный распад) и  $\beta^+$  (позитронный распад).

В отличие от  $\alpha$ -частиц  $\beta$ -частицы одного и того же элемента обладают различным запасом энергии. Это объясняется тем, что при  $\beta$ -распаде из атомного ядра вылетают одновременно с  $\beta$ -частицей нейтрино. Нейтрино – это электрически нейтральная частица, движущаяся со скоростью света, не имеющая массы покоя и обладающая большой проникающей способностью. Частица, испускаемая вместе с позитроном ( $\beta^+$ ), называется нейтрино ( $\nu^+$ ), а испускаемая вместе с электроном ( $\beta^-$ ) – антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ). Энергия, освобождаемая при каждом акте распада, распределяется между  $\beta$ -частицей и нейтрино. Если  $\beta$ -частица вылетает из ядра с большим запасом энергии то нейтрино имеет малый уровень энергии и наоборот. Поэтому энергетический спектр (распределение частиц по энергиям) бета излучения сплошной или непрерывный. Средняя энергия  $\beta$ - частиц в спектре равна примерно 1/3 их максимальной энергии (рис. 3).

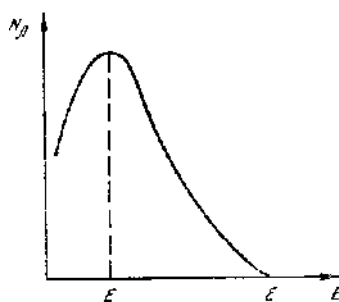


Рис. 3. Распределение  $\beta$ - частиц по энергиям.  $N_\beta$  – число  $\beta$ -частиц,  $E$  - их энергия.

Поскольку  $\beta$ -частицы одного и того же радиоактивного элемента имеют различный запас энергии, то величина их пробега в одной и той же среде будет неодинаковой. Путь  $\beta$ -частиц в веществе извилист, так как обладая крайне малой массой, они легко изменяют направление движения под действием электрических полей встречных атомов. Бета-излучение обладает меньшим эффектом ионизации, чем альфа-излучение. Оно образует 50 – 100 пар на 1см пути в воздухе и имеет «рассеянный тип ионизации».

Пробег  $\beta$ -частиц в воздухе может составлять в зависимости от энергии до 25 м, в биологических тканях – до 1 см. Скорость движения  $\beta$ -частиц в вакууме равна  $1 \cdot 10^{10}$  –  $2,9 \cdot 10^{10}$  см/с (0,3 – 0,99 скорости света).

Различные радиоактивные изотопы значительно отличаются друг от друга по уровню энергии  $\beta$ -частиц. Максимальная энергия  $\beta$ -частиц различных элементов имеет широкие пределы от 0,015 – 0,05 МэВ (мягкое бета-излучение) до 3 -12 МэВ (жесткое бета-излучение).

Проникающая способность  $\beta$ -частиц примерно в 100 раз выше, чем  $\alpha$ -частиц. Полная и удельная ионизация, создаваемая бета-излучением значительно меньше, чем у альфа-излучения.

*Гамма-лучи ( $\gamma$ -кванты).* Представляет собой поток коротковолновых электромагнитных волн, испускаемых возбужденными атомными ядрами или при радиоактивном превращении атомных ядер (альфа-, бета-распаде) и ядерных реакциях. Гама-излучение сходно с видимым светом, инфракрасными лучами, рентгеновским излучением, являющихся так же по своей природе, электромагнитными волнами. Однако эти виды электромагнитного излучения отличаются условиями образования и определенными свойствами (длинной волны и энергией).

Гамма-кванты лишены массы покоя. Это значить, что кванты (фотоны) существуют только в движении. Они не имеют заряда и поэтому в электрическом и магнитном поле не отклоняются. В веществе и вакууме гамма-лучи распространяются прямолинейно и равномерно во все стороны от источника. Скорость распространения их в вакууме равняется скорости света ( $3 \cdot 10^{10}$ )см/с). Наиболее важной характеристикой гамма-лучей является энергия отдельного кванта.

Энергия  $\gamma$ -кванта ( $E_\gamma$ ) пропорциональна частоте колебаний и определяется по формуле:

$$E_\gamma = h\nu, \text{ где}$$

$h$  – универсальная постоянная Планка или энергетический эквивалент ( $6,62 \cdot 10^{-27}$  эрг/с или  $4,13 \cdot 10^{-21}$  МэВ/с;  $\nu$  – частота колебаний в секунду.

При радиоактивном распаде ядер обычно наблюдаются  $\gamma$ -кванты с энергиями от  $\sim 10$  кэВ до  $\sim 5$  МэВ, а при ядерных реакциях и с большими энергиями – до 20 МэВ.

Частота колебаний гамма-квантов связана с длиной их волны. Чем больше длина волны, тем меньше частота колебаний, и наоборот, частота колебаний обратно пропорциональна длине волны. Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и, следовательно, проникающая способность.

Гамма-излучатели очень редко имеют однозначную энергию кванта (моноэнергетический или монохроматический спектр). В состав потока гамма-излучения чаще входят кванты различных величин энергии. Однако набор их для каждого изотопа постоянен и образует линейчатый спектр излучения. Примером моноэнергетического гамма-излучения может служить цезий-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ). При изомерном переходе в его дочернее стабильное ядро  $^{137}\text{Ba}$  высвечиваются кванты с энергией 0,661 МэВ.

Линейчатый спектр излучения наблюдается при распаде изотопа йода ( $^{131}\text{I}$ ), когда высвечивается пять групп квантов с энергиями 0,08; 0,163; 0,364; 0,637 и 0,722 МэВ. Бром ( $^{82}\text{Br}$ ) излучает 11 групп гамма-квантов в пределах 0,248 – 1,453 МэВ, а кадмий ( $^{115}\text{Cd}$ ) – 13.

$\gamma$ -кванты не имеют заряда, массы покоя вызывают слабо ионизирующее излучение, но обладают большой проникающей способностью. Путь пробега в воздухе достигает 100 – 150 м.

Таким образом, наибольшей проникающей способностью обладают гамма-лучи, а наименьшей – альфа-лучи. Ионизирующая способность альфа-лучей очень высокая, гамма-квантов – низкая. Бета-лучи занимают в этом отношении промежуточное положение. Исходя из указанных свойств можно заключить, что радиоактивные вещества, испускающие альфа- и бета-частицы, наиболее опасны при попадании внутрь организма. Гамма-лучи оказывают разрушающее действие как при нахождении источника внутри организма, так и вне его. Кроме альфа-, бета- и гамма-лучей существуют другие типы излучения, в частности, рентгеновское и нейтронное.

*Рентгеновские лучи (X-лучи).* Также как и гамма-лучи, имеют электромагнитную природу. Они были открыты немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном в 1895 г. Рентгеновские лучи возникают при торможении быстрых электронов в электрическом поле атомов тяжелых металлов, обладают большой проникающей способностью и слабой ионизирующей способностью, вследствие чего широко используются в медицине в

диагностических целях. Получают рентгеновские лучи искусственно в рентгеновских трубках, электронных ускорителях.

*Нейтронное излучение.* Излучение, состоящее из потока нейтронов. Нейтроны, в отличие от заряженных частиц не имеют электрического заряда, что позволяет беспрепятственно проникать вглубь атомов. Достигая ядер, они поглощаются либо рассеиваются на них. Выбивая атомы из стабильных состояний, нейтронное излучение создают наведенную радиоактивность в материалах или тканях организма. Нейтронное излучение является косвенно ионизирующим: образование ионов происходит под действием не самих нейтронов, а вторичных тяжелых заряженных частиц и  $\gamma$ -квантов. При этом  $\gamma$ -кванты вызывают образование сравнительно редко распределенных в облучаемой ткани ионов, а тяжелые заряженные частицы образуют ионы с настолько высокой плотностью, что расстояние между ними сравнимо с размерами клеточных структур. При нейтронном излучении преобладают процессы, приводящие к ионизации с высокой линейной передачей энергии, поэтому его называют также плотно ионизирующим.

Нейтронное излучение используют для нейтронной терапии, определения содержания отдельных элементов и их изотопов в биологических средах; источниками нейтронов пользуются для быстрого получения короткоживущих радионуклидов.

Основной качественной характеристикой нейтронного излучения является энергетический спектр – распределение нейтронов по энергиям. При этом различают следующие энергетические группы нейтронов: тепловые и надтепловые, обладающие энергией теплового движения при комнатной температуре 0,025 эВ, промежуточные – с энергиями до 200 кэВ, быстрые – с энергиями от 200 кэВ до 20 МэВ и сверхбыстрые – с энергиями свыше 20 МэВ.

В медицинской радиологии используют главным образом быстрые, тепловые и надтепловые нейтроны, скорость которых в веществе при температуре окружающей среды 20 °С близка к скоростям движения атомов и молекул.

Наибольшее практическое значение в радиобиологии и экологии имеют быстрые нейтроны. Все остальные, образуясь по мере замедления в тканях быстрых нейтронов, также вносят свой вклад в общий процесс поглощения энергии. Быстрые нейтроны вызывают в 10, а медленные в 5 раз большие поражения, чем гамма-лучи. С нейтронным излучением можно встретиться на атомных реакторах и при ядерных взрывах.

Таблица 1.

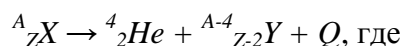
Основные свойства  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучений

Вид излучения	Природа излучения	Ионизирующая способность	Проникающая способность
Альфа	Ион гелия ( $\text{He}^{++}$ )	Очень высокая	Низкая: 0,1 мм $\text{H}_2\text{O}$ , лист бумаги
Бета	Электрон, позитрон	Высокая	Умеренная, < 0,5 мм алюминия
Гамма	Электромагнитное излучение	Низкая	Очень высокая: до нескольких сантиметров свинца

### Типы ядерных превращений

Существуют следующие типы или виды радиоактивного распада: альфа - распад, бета-распад (электронный, позитронный), электронный захват, внутренняя конверсия.

*Альфа-распад.* Сопровождается испусканием из ядра неустойчивого элемента  $\alpha$ -частицы, представляющей собой ядро атома гелия. При вылете  $\alpha$ -частицы ядро теряет 2 протона и 2 нейтрона, превращаясь в другое ядро, в котором число протона (заряд ядра) уменьшается на 2, а число частиц (массовое число) – на 4. Следовательно, при радиоактивном распаде в соответствии с правилом смещения (сдвига), сформулированным Фаянсом и Содди (1913), образующийся при альфа-распаде элемент (дочерний), смещается относительно исходного (материнского) на две клетки периодической системы влево. Процесс альфа распада можно представить следующим образом:



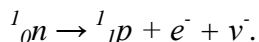
X – символ исходного ядра; Y – символ дочернего ядра; Q – освобожденный избыток энергии. Например:  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{222}_{86}\text{Rn} + Q$ .

Альфа – распад сопровождается обычно  $\gamma$ -излучением с энергией от десятков до сотен килоэлектронвольт. Возникновение гамма-излучения связано с тем, что часть материнских ядер испускает  $\alpha$ -частицы с различной энергией. Поэтому при распаде могут возникать возбужденные ядра (продукты распада), которые переходя в основное состояние, испускают  $\gamma$ -кванты сравнительно небольшой интенсивности. Альфа – распад достаточно распространенное ядерное превращение тяжелых ядер. В настоящее время известно более 160 природных и техногенных  $\alpha$ -активных ядер. Ядра с порядковым номером более 82, являются альфа-излучателями, а с порядковым номером менее 82, стабильны по отношению к альфа-распаду.

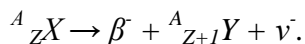
*Бета – распад.* Ряд естественных и искусственных радиоактивных элементов претерпевает распад с испусканием электрона. Некоторые искусственные радиоактивные изотопы претерпевают распад с испусканием позитрона. Электроны и позитроны, испускаемые ядрами, называют бета-частицами, а сами ядра  $\beta$ -активными.



Если в ядре имеется избыток нейтронов (нейтронная перегрузка ядра), то происходит электронный бета-распад. Этот процесс возникает в результате внутриядерного превращения нейтрона в протон, а ядро испускает электрон и антинейтрино:

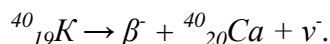


В общем виде электронный распад может быть записан следующим образом:



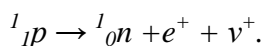
При этом распаде заряд ядра и соответственно атомный номер элемента увеличивается на единицу, т.е. дочерний элемент в таблице Д.И. Менделеева на один номер сдвигается вправо от исходного, массовое число остается без изменения.

Электронный бета-распад характерен для многих естественных и искусственно полученных радиоактивных элементов. Примером бета-распада может служить распад изотопа калия-40 с превращением его в кальций:

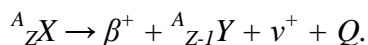


При электронном бета-распаде часть дочерних ядер при своем образовании оказывается на промежуточных энергетических уровнях и при переходе на основной на основной уровень испускает  $\gamma$ -кванты с энергией от десятков до тысячи килоэлектронвольт или конкурирующие с ними электроны внутренней конверсии. Среди естественных радиоактивных нуклидов основными гамма-излучателями являются именно  $\beta$ -излучатели.

Если соотношение нейтронов и протонов в ядре обусловлено избытком протонов, то происходит позитронный бета-распад, при котором ядро испускает позитрон и нейтрино, а один из протонов превращается в нейтрон:



Позитронный распад можно записать уравнением:



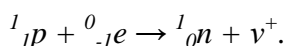
Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома «лишний» электрон или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару «позитрон-электрон», которая мгновенно превращается в два гамма-кванта с энергией, эквивалентной массе частиц ( $e^+ + e^-$ ). Процесс превращения пары «позитрон-электрон» в два гамма-кванта получил название *аннигиляции* (уничтожения), а возникающее электромагнитное излучение – *аннигиляционным*. В данном случае происходит превращение одной формы материи – частиц вещества в другую форму – в гамма-фотоны. Это подтверждается существованием обратной реакции – реакции *образования пары*, при которой гамма-фотон достаточно высокой энергии, пролетая через вещество, под действием достаточно сильного

электрического поля вблизи ядра атома превращается в пару «электрон-позитрон» (см. взаимодействие гамма-излучения с веществом).

Таким образом, при позитронном распаде в конечном итоге за пределы материнского атома вылетают не частицы, а два гамма-кванта, каждый из которых обладает энергией в 0,511 МэВ, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц – позитрона и электрона:

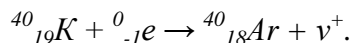
$$E = 2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}.$$

*Электронный захват.* Превращение ядра может быть осуществлено путем электронного захвата, когда один из протонов ядра захватывает электрон с оболочек атома, чаще всего с ближайшего к нему К-слоя или реже (примерно в 100 раз) с L-слоя, и превращается в нейтрон, такой процесс называют. Электронным К- или L- захватом. Протон превращается в нейтрон согласно следующей реакции:



Порядковый номер нового ядра становится на единицу меньше порядкового номера исходного ядра, а массовое число не меняется. Дочерний элемент в таблице Д.И. Менделеева отстоит на одну клетку влево от материнского.

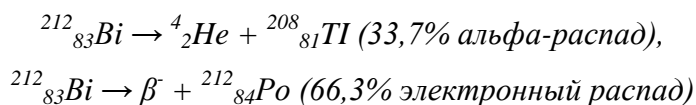
Превращение ядер при К-захвате выглядит следующим образом:



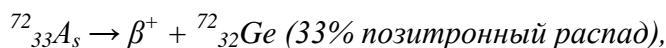
Освободившееся место, занимал в К- или L-слое захваченный электроном из более отдаленных от ядра слоев оболочки атома. Избыток энергии, освободившейся при таком переходе, испускается атомом в виде характеристического рентгеновского излучения, а единственной вылетающей из ядра частицей является нейтрино. Атом по-прежнему сохраняет электрическую нейтральность, так как количество протонов в ядре при электронном захвате уменьшается на единицу.

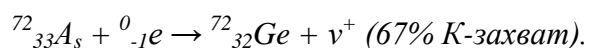
Позитронный распад и электронный захват, как правило, наблюдают только у искусственных радиоактивных изотопов.

Некоторые ядра могут распадаться двумя или тремя способами: путем альфа- и бета-распадов, позитронного распада и через К-захват. В таких случаях превращения осуществляются в строго определенном соотношении, например:

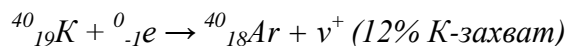
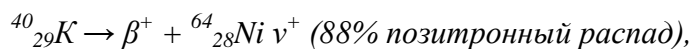


или

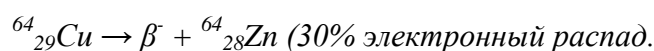
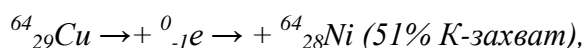
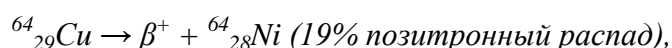




Естественный долгоживущий радиоизотоп калия ( $^{40}_{19}\text{K}$ ;  $T = 1.49 \cdot 10^9$  лет), количество которого в смеси нерадиоактивного калия ( $^{39}\text{K}$ ) составляет 0,0119%, подвергается электронному распаду и К-захвату:



У изотопа меди  $^{63}_{29}\text{Cu}$  превращение в никель осуществляется путем позитронного распада и К-захвата, а в цинк – путем электронного распада:



*Внутренняя конверсия.* Возбужденное состояние ядра атома в результате того или иного ядерного превращения свидетельствует о наличии в нем избытка энергии. Переход возбужденного в нем избытка энергии. Переход возбужденного ядра в состояние с меньшей энергией (стабильное состояние) может происходить не только путем излучения гамма-квантов или выбрасывания какой-либо частицы, но и путем внутренней конверсии, или конверсии с образованием электронно-позитронных пар.

Сущность явление внутренней конверсии на атомных электронах состоит в том, что ядро передает энергию возбуждения одному из электронов внутренних слоев (К-, L-, M-), который в результате этого удаляется за пределы атома. Который в результате этого удаляется за пределы атома. Такие электроны получили название *электронов внутренней конверсии*. Следовательно, испускание электронов конверсии обусловлено непосредственным электромагнитным воздействием ядра с электронами оболочки. Конверсионные электроны имеют линейчатый спектр энергии в отличие от электронов бета-распада, дающий сплошной спектр.

Если энергия возбуждения превосходить 1,022 МэВ, то переход ядра в нормальное состояние может сопровождаться излучением пары «электрон-позитрон» с последующей их аннигиляцией.

После того как произошла внутренняя конверсия, в электронной оболочке атома возникает «вакантное» место вырванного электрона конверсии. Один из электронов с более отдаленных энергетических уровней осуществляет квантовый переход на «вакантное» место с испусканием характеристического рентгеновского излучения.

*Самопроизвольное деление ядер.* Этот процесс наблюдается у радиоактивных элементов с большим атомным номером (например,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и др.) при захвате их ядрами медленных нейтронов. Вероятность осуществления самопроизвольного деления по сравнению с вероятностью их  $\alpha$ -распада незначительна.

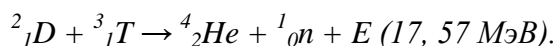
Одни и те же ядра при делении образуют различные пары осколков, которые представляют собой ядра средних массовых чисел, например:



В результате деления тяжелых ядер образуются осколки с избыточным количеством нейтронов. Эти осколки часто претерпевают несколько последовательных  $\beta$ -распадов.

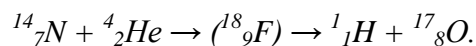
Возникающие при спонтанном делении тяжелых ядер ядра легких элементов имеют большую энергию связи, приходящуюся на одну частицу. Поэтому при делении выделяется энергия, соответствующая разнице энергии связи частиц в ядрах тяжелого и легких элементов. Это явление используется для получения ядерной энергии. В случае, если возникающие при делении одного ядра нейтроны вновь используются для последующего деления других ядер, реакция будет цепной. Условия для такой реакции создаются в реакторах. Когда цепная реакция нарастает лавинообразно в результате выделения энергии в течение короткого промежутка времени, происходит взрыв. Это явление возможно только в том случае, когда масса способного к делению материала достигает критической величины (взрыв атомных зарядов).

*Термоядерные реакции.* Эти реакции протекают лишь при температурах, достигающих нескольких миллионов градусов. В этих условиях ядра легких элементов, двигаясь с большими кинетическими энергиями, сближаются на малые расстояния и объединяются в ядра более тяжелых элементов, например взаимодействие дейтерия и трития с образованием гелия и выделением энергии:



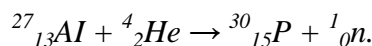
На этом принципе основано устройство термоядерных зарядов. Они состоят из плутониевого запала, служащего для создания высокой температуры, и смеси изотопов легкого элемента.

*Искусственное преобразование атомных ядер.* Впервые искусственное преобразование ядер осуществил Э. Резерфорд в 1919 г. При изучении взаимодействия альфа-частицы с ядрами азота он выявил случаи, когда  $\alpha$ -частица, попадая в атомное ядро, остается в нем, выбивая протон. При этом стабильный изотоп  $^{14}_7\text{N}$  превращается в изотоп кислорода  $^{17}_8\text{O}$  согласно следующей реакции:

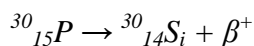


Проникновение  $\alpha$ -частицы в ядро азота приводит к образованию неустойчивого ядра фтора, которое сразу же превращается в ядро кислорода с испусканием протона. Искусственные преобразования ядер были осуществлены и на других элементах. В 1934 г И. Кюри и Ф. Жолио –Кюри обнаружили, что при бомбардировке алюминия, магния и бора  $\alpha$ -частицами полония эти элементы сами становятся на некоторое время радиоактивными. Этот процесс происходит следующим образом:  $\alpha$ -частицы проникают в ядра бомбардируемых атомов, вызывают коренную перестройку атомного ядра, сопровождающуюся выделением нейтронов и увеличением числа протонов. В результате образуются атомные ядра новых элементов.

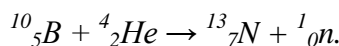
Образование новых элементов было подтверждено химическим анализом. Установлено, что бор превращается в один из изотопов азота, а алюминий – в один из изотопов фосфора, которые оказываются радиоактивными. Эти реакции могут быть записаны следующим образом:



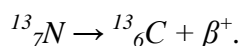
Затем радиоактивный изотоп  $^{30}_{15}\text{P}$ , образовавшийся из стабильного ядра алюминия, распадается, превращаясь в устойчивый элемент кремния с выделением позитрона:



При бомбардировке бора происходит следующая реакция:



Радиоизотоп азота  $^{13}_7\text{N}$  распадается также с выделением позитрона:



Эти ядерные реакции были первыми, в которых по воле человека создавались новые, ранее несуществующие, радиоактивные изотопы. Так была открыта *искусственная радиоактивность*. И положено начало получению искусственных радиоизотопов практически всех элементов периодической системы.

Следует отметить, что И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри открыли не только искусственную радиоактивность, но и новый вид радиоактивного распада – позитронный распад, который не наблюдается у естественных радиоактивных элементов.

В настоящее время радиоактивные изотопы радиоактивные изотопы можно получить при разнообразных ядерных реакциях с использованием в качестве бомбардирующих ядерных частиц – протонов, дейтронов, нейтронов, а также гамма-квантов. Сущность ядерных реакций состоит в том, что ядра-мишени стабильных атомов, подвергаясь бомбардировке элементарными частицами, захватывают их и получают дополнительную

кинетическую энергию; в результате образуется ядро с избытком энергии (возбужденное ядро). Переход ядра из возбужденного состояния в стабильное осуществляется путем излучения избыточной энергии в виде  $\alpha$ -,  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, т.е. происходит процесс радиоактивного распада. При использовании в качестве частиц-снарядов протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц ядерная реакция (проникновение в ядро) происходит с большим трудом, так как все они обладают положительным зарядом и отталкиваются от ядра в результате действия кулоновских сил. Чтобы данные частицы проникли в положительно заряженное ядро, они должны иметь очень большую кинетическую энергию. В связи с этим были сконструированы приборы для разгона заряженных частиц в сильном электрическом поле. Такие приборы получили общее название ускорителей (линейные ускорители, циклотроны, бетатроны и фазотроны).

Особенно удачной частицей для реализации ядерных превращений оказались свободные нейтроны, получаемые обычно в атомных реакторах. Обладая достаточной массой и не имея заряда, они не отталкиваются ядром, а беспрепятственно взаимодействуют с ним, преобразуя ядро-мишень стабильного элемента в радиоактивный изотоп.

При бомбардировке ядра-мишени стабильного элемента выше указанными частицами происходит или превращение одного элемента в другой (трансмутация элементов), или же образуется изотоп исходного элемента.

Создание ускорителей, а также использование нейтронов в ядерных реакциях расширили возможности получения искусственных радиоактивных изотопов, которые нашли широкое применение в биологии, медицине, и других областях науки и техники.

### **Закон радиоактивного распада**

Количество любого радиоактивного изотопа со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада (превращения ядер). Скорость распада определяется строением ядра, поэтому, и поэтому нельзя повлиять на этот процесс никакими обычными физическими или химическими способами, не изменив состояние ядра атома. Для каждого радиоактивного элемента средняя скорость распада его атомов постоянна, неизменна и характерна только для данного элемента. *Постоянная радиоактивного распада* ( $\lambda$ ) показывает вероятность распада определенной доли ядер единицу времени. Размерность постоянной распада выражают в обратных единицах времени:  $\text{с}^{-1}$ ,  $\text{мин}^{-1}$ ,  $\text{ч}^{-1}$  и т. д., чтобы показать, что количество радиоактивных ядер не растет, а убывает.

Основной закон радиоактивного распада устанавливает, что за единицу времени распадается всего одна и та же доля имеющихся в наличии ядер. Математически закон радиоактивного распада выражается уравнением:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ где}$$

$N_t$  – количество радиоактивных ядер, оставшихся по прошествии времени  $t$ ;  $N_0$  – исходное количество радиоактивных ядер в момент времени  $t = 0$  ( $N_0 > N_t$ );  $e$  – основание натуральных логарифмов ( $e = 2,72$ );  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада;  $t$  – промежуток времени, равный  $t - t_0$

Так как число радиоактивных ядер  $N$  в результате распада со временем убывает, то уменьшается и скорость распада. Скорость распада называют также активностью радионуклида.

Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов в практике пользуются вместо постоянной распада периодом полураспада.

*Период полураспада* ( $T_{1/2}$ ) – это время, в течение которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер. Он обозначается буквой  $T$  и выражается в единицах времени. Для радиоактивных изотопов период полураспада имеет значения от долей секунды до миллиарда лет. Соответственно и радиоактивные элементы разделяются на короткоживущие (часы, дни) и долгоживущие (годы).

Связь между периодом полураспада и постоянной распада легко выводится из уравнения закона радиоактивного распада  $N_t = N_0 e^{-\lambda t}$ , если в это выражение подставит  $t = T$  и  $N_t = N_0 / 2$ , то получим,  $N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T}$ . Сократив  $N_0$  и взяв натуральный логарифм, получим:

$$\lambda T = \ln 2, \text{ т.е. } \lambda T = 0,693, \text{ откуда: } \lambda = 0,693/T, T = 0,693/\lambda$$

Это соотношение показывает, что между постоянной распада и периодом полураспада имеется обратная зависимость, т.е. чем больше значение  $\lambda$ , тем меньше значение  $T$ , наоборот. заменив  $\lambda$  в формуле ее значение, получим:

$$N_t = N_0 e^{-0,693 t/T}.$$

В соответствии с законом радиоактивного распада можно рассчитать убыль активности любого радиоактивного препарата.

Пример: Активность ( $A_0$ )  $^{32}\text{P}$  на определенный день равна 5 мКи. Определить активность этого элемента через неделю. Период полураспада  $T^{32}\text{P} = 14,3$  дня. Активность  $^{32}\text{P}$  через 7 дней будет равна:  $A_t = 5 \cdot 2,72^{-0,693 \cdot 7/14,3} = 5 \cdot 2,72^{-0,34} = 3,55$  мКи.

Таким образом, число ядер радиоактивного изотопа уменьшается со временем по экспоненциальному закону. Графически закон радиоактивного распада выражается экспоненциальной кривой (рис. 4).

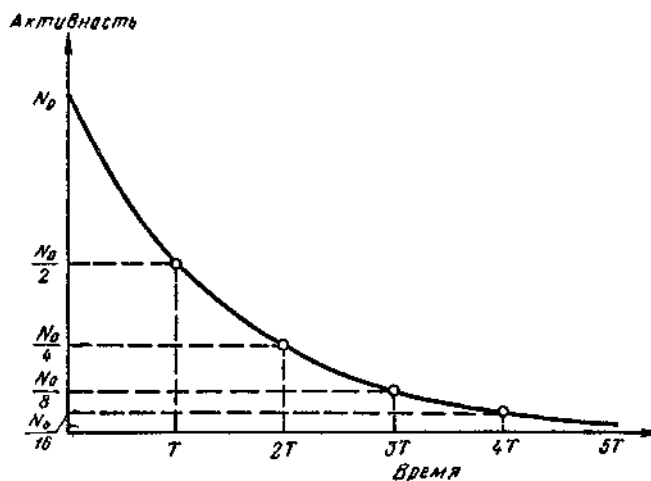


Рис. 4. Кривая радиоактивного распада

На рис. 4 видно, что с увеличением числа периодов полураспада количество нераспавшихся атомов убывает, асимптотически приближаясь к нулю.

Особенность радиоактивного распада состоит в том, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно, в различное время. Момент распада каждого ядра не может быть указан заранее. Поэтому распад любого радионуклида подчиняясь статическим закономерностям, носит вероятностный характер и может быть математически определен для большого количества радиоактивных атомов. Иными словами, распад ядер происходит неравномерно то большими, то меньшими порциями. Из этого следует практический вывод, что при одном и том же времени счета радиоактивного препарата мы можем получить разные значения. Следовательно, для получения верных данных необходимо одну и ту же пробу считать не один, а несколько раз и чем больше, тем точнее будут показатели.

### Вопросы и задания

1. Каково строение атома и ядра атома.
2. Что такое ядерные силы, дефект массы.
3. Что такое  $\alpha$ ,  $\beta$  – распад.
4. Что такое внутренняя конверсия.
5. Что такое нуклон
6. Как схематически обозначают тип атомного ядра?
7. Что такое изотопы, изомеры, изобары?
8. Что такое нуклиды?
9. Что представляют собой альфа-излучение, бета-излучение, гамма-излучение?
10. Какую роль в бета-превращениях играет нейтрино?
11. Что такое ядерная реакция?
12. Что такое активность радионуклида?
13. Дайте определение основному закону радиоактивного распада.



14. Что такое период полураспада?
  15. Какая существует связь между активностью и массой радионуклида? Напишите формулу.
- Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

### Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
4. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
5. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
6. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
7. *Тюменев Р.С., Бадрутдинов О.Р.* Радиоэкологические исследования окружающей среды. Методические указания для практических занятий студентов. Казань,1998.-28с.
8. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
9. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.

### Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## Лекция 2.

### Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы взаимодействия гамма-излучения и корпускулярных частиц с веществом, а также единиц измерения радиоактивности.

**Ключевые слова.** Ионизация, активность, рентген, кюри, поглощенная доза, эквивалентная доза, взвешивающие коэффициенты.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается решить задачи, написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи, вопросы к лекции и тесты

Обнаружение и регистрация всех видов ядерных излучений ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения, нейтронов и т.д.), выбор материала для защиты, оценка биологического действия излучения основаны на эффектах, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом. Для понимания принципов этих явлений необходимо знать, каким образом различные по природе излучения взаимодействуют с веществом.

Все ионизирующие излучения подразделяются по своей природе подразделяются на электромагнитные и корпускулярные. Электромагнитные излучения – это рентгеновское излучение, гамма-излучение и тормозное излучение, возникающее при прохождении через вещество сильно ускоренных заряженных частиц. Видимый свет и радиоволны тоже электромагнитные излучения, но они не обладают ионизирующей способностью, так как характеризуются большей длиной волны, или как принято говорить меньшей жесткостью. Все остальные виды ионизирующих излучений имеют корпускулярную природу. Большинство из них заряженные корпускулы: бета-частицы (электроны, позитроны), протоны (ядра водорода), дейтроны (ядра тяжелого водорода – дейтерия), альфа-частицы (ядра гелия) и тяжелые ионы (ядра других элементов). Кроме того, к корпускулярным излучениям относят и не имеющие заряда ядерные частицы – нейтроны.

Глубина проникновения ионизирующего излучения зависит, с одной стороны, от природы излучения, заряда составляющих их частиц и энергии, а с другой стороны от состава и плотности облучаемого вещества.

### Взаимодействие корпускулярных излучений с веществом

*Взаимодействие  $\alpha$ - и  $\beta$ - частиц с веществом.* Заряженные частицы, проходя через вещество, постоянно теряют энергию в результате взаимодействия с электронами атомов, а также с электромагнитным полем ядра. При электромагнитном взаимодействии заряженных частиц с полем ядра происходит упругое рассеяние. Вследствие упругого рассеяния

меняется направление движения частиц, а не их энергия. При этом изменяется направление движения частицы, ее энергия остается практически такой же, как и до взаимодействия. В процессе взаимодействия заряженных частиц с электронами атомов происходит неупругое рассеяние. При этом часть энергии частиц передается электрону, который в результате либо переходит в более высокое энергетическое состояние, либо вылетает за пределы атома. В первом случае говорят о возбуждении, во втором – об ионизации атома. Электроны, выбитые из атома среды, способны проводить вторичную ионизацию. Другой неупругий электромагнитный процесс возникает вследствие торможения заряженной частицы в электрическом поле ядра. При этом происходит испускание излучения, которое близко по своей характеристике к рентгеновскому и называется *тормозным излучением*. Неупругое взаимодействие характерно для  $\alpha$ -частиц, а для  $\beta$ -частиц как неупругое так и упругое рассеяние.

Уменьшение кинетической энергии заряженных частиц в электрическом поле ядра составляет радиационные потери, которые будут тем значительнее, чем больше порядковый номер атомов среды (плотность вещества) и энергия частиц. Следует отметить, что радиационные потери и тормозное излучение характерно для  $\beta$ -частиц высоких энергий, превышающих нескольких мегаэлектронвольт. Исходя из этого, в практической работе для защиты от бета-излучения целесообразно использовать материалы малой плотности, такие как плексиглас, стекло, полимеры, чтобы избежать возникновения тормозного излучения, обладающего большой проникающей способностью.

Вероятность взаимодействия заряженных частиц с ядрами очень мала, так как ядра имеют крайне малые объемы атома. Так из 500 000  $\alpha$ -частиц, проходящих через вещество, в среднем только одна частица взаимодействует с ядром.

Величиной, определяющей энергетическую сторону процесса ионизации, служит так называемая *работа ионизации* – средняя работа, затрачиваемая на образование одной пары ионов. Энергия, теряемая  $\alpha$ -  $\beta$ -частицами в результате одного акта ионизации в воздухе составляет 35 и 34 эВ соответственно, при этом в среднем около половины ее идет на ионизацию, другая половина – на возбуждение атомов и молекул среды.

Число ионизированных и возбужденных атомов, образуемых  $\alpha$ -частицами на единице пути в среде самая большая из всех ядерных излучений. В воздухе на 1 см пути  $\alpha$ -частица образует несколько десятков тысяч пар ионов, в то время как  $\beta$ -частица - 50-100 пар ионов. Это обусловлено тем, что масса  $\alpha$ -частицы примерно в 7000 раз больше  $\beta$ -частицы, следовательно, при одной и той же энергии ее скорость значительно меньше, чем у  $\beta$ -частицы. Путь, проходимый  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицами в веществе, на протяжении которого она

производит ионизацию, называется *пробегом частицы*. Испускаемые при радиоактивном распаде  $\alpha$ -частицы обладают скоростью примерно 20 тыс. км/с, в то время как скорость  $\beta$ -частицы близка к скорости света и составляет 200-270 тыс. км/с. Очевидно, чем меньше скорость частицы, тем больше вероятность ее взаимодействия с атомами среды, следовательно, и больше пробег.

Таблица 2

Пробеги  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц в воздухе и биологической ткани, см

Энергия частиц*, МэВ	$\alpha$ -частица		$\beta$ -частица	
	Воздух	Ткань	Воздух	Ткань
0,05	0,06	—	2,7	$3,4 \cdot 10^{-3}$
0,1	0,10	—	9,3	0,012
0,6	0,38	—	150	0,17
1,0	0,52	$7,2 \cdot 10^{-4}$	290	0,34
2,0	1,0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	660	0,78
3,0	1,7	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^3$	1,2
5,0	3,5	$4,4 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^3$	2,1

\*Для  $\beta$ -частиц приведена максимальная энергия в спектре.

В табл. 2 приведены пробеги в воздухе и биологической ткани. Как видно из таблицы пробеги, особенно  $\alpha$ -частиц очень малы. Слой воздуха толщиной 10 см, тонкая фольга, резиновые перчатки, одежда полностью экранируют альфа-излучение.

Хотя пробег  $\beta$ -частиц значительно больше, чем  $\alpha$ -частиц, защита от бета-излучения не вызывает проблем. Несколько миллиметров алюминия или стекла обычно полностью экранируют поток. Однако для высокоактивных источников с энергией, превышающей 1 МэВ, приходится учитывать, как отмечалось выше, что часть энергии уносится высокоэнергетическими  $\gamma$ -квантами, возникающими при торможении и обладающими большой проникающей способностью.

Взаимодействие гамма-излучения с веществом. При радиоактивном распаде ядра испускают  $\gamma$ -кванты с энергией в пределах от нескольких кэВ до нескольких МэВ. Гамма-излучение взаимодействует с электронами атомов и с электрическим полем ядра. Проходя через вещество, энергия квантов ослабляется по экспоненциальному закону, т.е. никогда не поглощается полностью (рис. 4). В этом его принципиальное отличие от корпускулярного излучения.

*Взаимодействие нейтронов с веществом.* Принципиально по-иному происходит взаимодействие при прохождении нейтронов через вещество. В отличие от заряженных частиц нейтроны не несут электрического заряда. Это позволяет им беспрепятственно

проникать в глубь атомов. Нейтроны взаимодействуют не с электронами, а только с ядрами атомов среды, передавая им часть своей энергии. Этот процесс называется упругим рассеянием и продолжается до тех пор, пока энергия нейтрона не станет, равна энергии теплового движения атомов среды, равной 0,25 эВ. Ядра, получившие от нейтрона часть кинетической энергии, «вылетают» из электронной оболочки и, будучи положительно заряженными, производят ионизацию атомов среды.

Доля энергии, передаваемая нейтронами, тем больше, чем меньше масса атомов среды. В процессе упругого рассеяния на ядрах углерода, азота, кислорода и других элементов, входящих в состав тканей, нейтрон теряет 10-15% энергии, а при столкновении с равным с ним по массе ядрами водорода – протонами, энергия нейтрона уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону отдачи (рис. 5). Поэтому вещества, содержащие большое количество атомов водорода (вода, парафин) используют для защиты от нейтронного излучения. В них нейтроны быстро растрачивают свою энергию и замедляются. Например, для превращения быстрого нейтрона с энергией 1 МэВ в тепловой с энергией 0,025 эВ необходимо 25 соударений с ядрами водорода или 2100 соударений с ядрами урана.

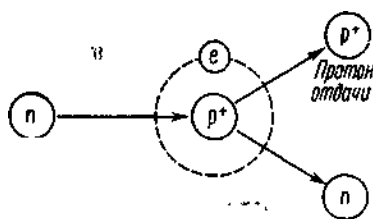


Рис.5. Взаимодействие быстрого нейтрона с атомами водорода.

Часть энергии нейтрона передается протону отдачи в качестве кинетической энергии. Нейтрон рассеяния отклоняется от прежнего направления и обладает меньшей энергией.

Наряду с упругим, возможно неупругое рассеяние нейтронов. В этом случае корпускулярные и электромагнитные излучения, помимо длины пробега, различаются пространственным распределением вызываемых ими актов ионизации.

### **Взаимодействие гамма-излучения с веществом**

Основными процессами взаимодействия гамма-излучения с веществом являются фотоэлектрическое поглощение (фотоэффект), комптоновское рассеяние (комpton-эффект) и образование электронно-позитронных пар (образование пар)(рис.6). Относительная величина каждого из этих эффектов зависит от атомного номера поглощающего материала.

*Фотоэлектрическое поглощение.* При данном виде взаимодействия  $\gamma$ -квант сталкиваясь, с прочно связанным электроном (преимущественно с электронами  $K$ -слоя) в атомах облучаемого вещества, полностью расходует свою энергию на отрыв электрона, сам исчезает, а электрон приобретает кинетическую энергию, равную энергии  $\gamma$ -кванта минус энергии связи электрона в атоме. Таким образом, при фотоэлектрическом эффекте вся энергия первичного  $\gamma$ -кванта преобразуется в кинетическую энергию фотоэлектронов, которые ионизируют атомы и молекулы. На освободившееся место в орбите  $K$ -слоя переходит электрон с  $L$ -слоя, на  $L$ -слой – электрон  $M$ -слоя и т.д. с высвечиванием характеристического рентгеновского излучения.

Процесс фотоэффекта невозможен на слабосвязанных или свободных электронах (не связанных с атомом), так как они не могут поглощать  $\gamma$ -квант.

Фотоэлектрическое поглощение преобладает лишь в том случае, когда энергия  $\gamma$ -кванта не превышает 50 кэВ, а поглотитель представляет собой вещество с большим атомным номером (например, свинец).

В воздухе, воде и в биологических тканях фотоэффект составляет 50% при энергии квантов порядка 60 кэВ. При  $E_\gamma$  120 кэВ доля фотоэлектрического поглощения составляет около 10 %, начиная с 200 кэВ этим процессом можно пренебречь. В этом случае гамма-излучение ослабляется за счет комптоновского рассеяния.

*Комптоновское рассеяние.* При этом эффекте  $\gamma$ -кванты, сталкиваясь с электронами, передают им не всю свою энергию, а только часть ее и после соударения изменяют свое направление движения, т. е. рассеиваются. Образовавшиеся вследствие соударения электроны (электроны отдачи) приобретают значительную кинетическую энергию и растрачивают ее на ионизацию вещества (вторичная ионизация).

В отличие от процесса фотоэлектрического поглощения при комптон-эффекте  $\gamma$ -кванты взаимодействуют с внешними электронами, энергия связи которых минимальная. Комптоновское рассеяние возможно на свободных электронах. Комптон-эффект преобладает над другими процессами взаимодействия довольно в широком диапазоне энергий: от 0,5 до 5 МэВ в свинце; от 1 до 10 МэВ в железе, и от 0,02 до 23 МэВ в воздухе. Таким образом, в результате комптон-эффекта интенсивность гамма-излучения ослабляется за счет того, что  $\gamma$ -кванты, взаимодействуя с электронами среды, рассеиваются в различных направлениях и уходят за пределы пучка, а также за счет передачи электронам части своей энергии.

*Образование электронно-позитронных пар.* Некоторые  $\gamma$ -кванты с энергией равной или более 1,02 МэВ, проходя через вещество вблизи ядра атома, и взаимодействуя с

сильным электрическим полем ядра, преобразуются в пару «электрон-позитрон». В данном случае происходит переход одной формы материи – гамма-излучения в другую – частицы вещества. Образование такой пары частиц возможен только при энергиях  $\gamma$ -квантов, не меньших, чем энергия, эквивалентная массе обеих частиц – электрона и позитрона.

Образовавшаяся электронно-позитронная пара в дальнейшем исчезает (аннигилирует), превращаясь в два вторичных  $\gamma$ -кванта с энергией, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц – 0,511 МэВ (см. позитронный распад). Вторичные  $\gamma$ -кванты способны вызвать лишь комптон-эффект и в конечном счете фотоэффект, т.е. терять энергию только при соударении с электронами. Вероятность процесса образования пар увеличивается с увеличением энергии  $\gamma$ -квантов и плотности поглотителя. Гамма-лучи высоких энергий (более 8 МэВ) могут взаимодействовать с ядрами атомов (ядерный эффект). Вероятность такого эффекта весьма мала, и этот вид взаимодействия практически не ослабляет излучений в веществе.

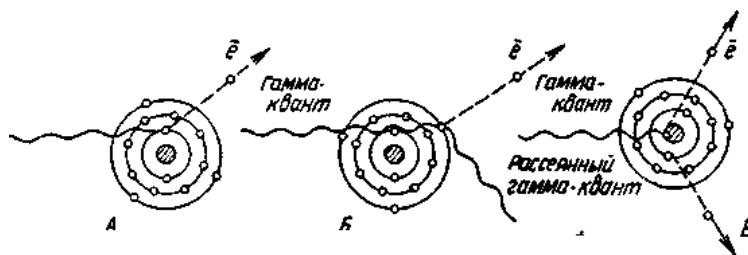


Рис. 6. Виды взаимодействия гамма излучения с веществом:

*A* — фотоэлектрическое поглощение *Б* — комптоновский эффект, *В* — образование пар.

Закон ослабления гамма-излучения веществом отличается от закона ослабления  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц. Пучок  $\gamma$ -лучей поглощается непрерывно с увеличением толщины поглотителя; его интенсивность не обращается в нуль ни при какой толщине поглотителя. Это означает, что какой бы ни была толщина слоя вещества, нельзя полностью поглотить поток  $\gamma$ -лучей, а можно только ослабить его интенсивность на любое заданное число. В этом существенное различие характера ослабления  $\gamma$ -лучей от ослабления  $\alpha$ - или  $\beta$ - частиц, для которых всегда можно подобрать такой слой вещества, в котором полностью поглощается поток этих заряженных частиц.

Таким образом, электромагнитные излучения непосредственно ионизации не производят, но в процессе взаимодействия с атомами среды передает свою энергию электронам, которые затем производят ионизацию.

Следовательно, и для корпускулярного, и для электромагнитного излучения, испускаемого при радиоактивном распаде, конечным эффектом взаимодействия с веществом является ионизация и возбуждение.

Энергию, переданную заряженной частицей на единицу длины ее пробега в веществе, называют линейной передачей энергии (ЛПЭ).

За единицу ЛПЭ принимают 1 кэВ/мкм ( $1\text{ кэВ/мкм} = 62\text{ Дж/м}$ ). В зависимости от значения ЛПЭ все ионизирующие излучения делят на редко- и плотно ионизирующие. К редко ионизирующим излучениям принято относить все виды излучений (независимо от физической природы), имеющие  $\text{ЛПЭ} < 10\text{ кэВ/мкм}$ , а плотно ионизирующим – те, для которых ЛПЭ превышает эту величину. Нейтрон захватывается ядром атомов среды, происходит перераспределение энергии между частицами во вновь образовавшемся ядре, и из него вылетает нейтрон с меньшей энергией и  $\gamma$ -квант.

Таким образом, при нейтронном облучении конечный биологический эффект связан с процессами возбуждения или ионизации, производимой опосредованно заряженными частицами или  $\gamma$ -квантами, ионизирующая способность которого обусловлена вторичными электронами. Следовательно, преимущественный вклад того или иного вида ядерного взаимодействия нейтронов зависит от их энергии, а также от состава облучаемого вещества.

Нейтроны относят к плотно ионизирующим излучениям, так как образуемые ими протоны отдачи сильно ионизируют вещество. Однако их возникновение происходит на большой глубине из-за высокой проникающей способности нейтронов.

ЛПЭ заряженных частиц возрастает со снижением их скорости, поэтому в конце пробега отдача энергии всякой заряженной частицей максимальна, что приводит к характерному распределению ионизаций описываемому кривой Брэгга (рис. 7).

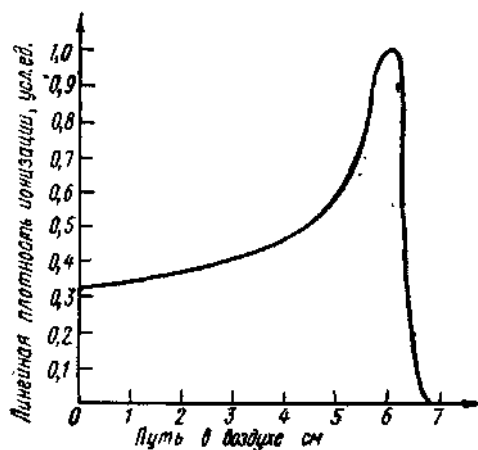


Рис.7. Кривая Брэгга. Ионизационные потери энергии  $\alpha$ - частиц, выраженные в условных единицах.



Эту особенность взаимодействия ядерных частиц используют при лечении опухолей, так как в этом случае значительная часть энергии сосредотачивается в глубине пораженной ткани при минимальном ее рассеянии в здоровых тканях по ходу пучка.

Прохождение через вещество фотонов рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, потока нейтронов, электронов или ускоренных ядер элементов может привести к поглощению части энергии веществом. При облучении живой материи наблюдаются биологические последствия радиационного воздействия. Биологический эффект облучения – результат поглощения энергии излучения атомами и молекулами, составляющими клетки и ткани. Иначе говоря, в радиобиологии выполняется *общий принцип Гроттгуса, согласно которому только часть энергии излучения может вызывать изменения в веществе, которая поглощается; энергия отраженного ли проходящего сквозь вещество излучения не оказывает действия*. Именно в силу этого принципа возникает различие, с одной стороны, между экспозиционной и поглощенной дозы и с другой стороны – между удельными потерями энергии и ЛПЭ. При прохождении ионизирующих излучений в веществе выделение энергии происходит лишь в отдельных, редко расположенных микрообъемах, так как обмен энергией *между излучением и атомами поглотителя носит вероятностный дискретный характер*.

Все виды ионизирующих излучений сами или опосредованно вызывают либо возбуждение, либо ионизацию атомов или молекул биосистем. Однако при облучении объектов различными видами ионизирующей радиации в равных дозах возникают различные биологические эффекты, что связано с пространственным распределением энергии в микрообъеме, т.е. с ЛПЭ.

Завершая этот раздел, следует дать определение основным понятиям, с которыми постоянно придется иметь дело:

**Ионизация – это акт разделения электрически нейтрального атома на две противоположные заряженные частицы: отрицательный электрон и положительный ион**

**Ионизирующее излучение - излучение, энергия которого достаточна для ионизации облучаемой среды.**

**Облучение – процесс взаимодействия излучения со средой.**

## Дозиметрия и радиометрия ионизирующих излучений

Необходимость количественной и качественной оценки действия ионизирующего излучения на организм человека и животных, различные объекты живой и неживой природы, проведения контроля радиационной безопасности при работе с излучениями способствовали развитию дозиметрии.

*Дозиметрия* – раздел ядерной физики и измерительной техники, которая изучает величины, характеризующие действие ионизирующего излучения на вещества, а так же методы и приборы для его качественного и количественного измерения.

*Радиометрия* – раздел прикладной ядерной физики, который разрабатывает теорию и практику измерения радиоактивности, и идентификацию радиоактивных элементов.

Несмотря на различие задач радиометрии и дозиметрии, они базируются на общих принципах обнаружения и регистрации ионизирующих излучений.

### Единицы измерения радиоактивности

Количество радиоактивного вещества, как правило, измеряется не единицами массы (килограмм, грамм, миллиграмм и т.п.), а активностью данного вещества, которая равна числу ядерных превращений (распадов) в единицу времени.

*Активность (A)* – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени.

Как следует из закона радиоактивного распада, чем больше ядерных превращений в единицу времени, тем больше его активность. Поскольку скорость распада радионуклидов различна, равные весовые количества радионуклидов имеют разную активность. Так, если взять с одинаковой массой  $^{238}\text{U}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^8\text{Li}$ , обладающие периодами полураспада  $4,5 \cdot 10^9$  лет, 14,3 дня и 0,89 соответственно, то самая высокая активность будет у лития и фосфора, а самая низкая у урана.

Единицей активности в СИ служит распад в секунду (расп/с). Этой единице присвоено наименование *беккерель* – Бк (Bq),  $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с (с}^{-1}\text{)}$

Часто употребляемой внесистемной международной единицей является *кюри* - Ки (Ci),  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ , что соответствует активности 1 г радия-226.

Кюри большая величина, поэтому обычно употребляют дольные единицы:

милликюри,  $1 \text{ мКи} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^7 \text{ Бк (распад/с)}$

микрокири,  $1 \text{ мкКи} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк (распад/с)}$

нанокюри,  $1 \text{ нКи} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10 \text{ Бк (распад/с)}$

пикокюри,  $1 \text{ пКи} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ Бк (распад/с)}$ , и т.д.

Беккерель, напротив, малая величина, поэтому употребляют кратные единицы:

килибеккерель,  $1 \text{ кБк} = 1 \cdot 10^3 \text{ Бк} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ Ки}$

мегабеккерель,  $1 \text{ МБк} = 1 \cdot 10^6 \text{ Бк} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Ки}$

гигабеккерель,  $1 \text{ ГБк} = 1 \cdot 10^9 \text{ Бк} = 1 \cdot 10 \text{ Ки}$

терабеккерель,  $1 \text{ ТБк} = 1 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Ки}$ , и т. д.

Концентрация радиоактивного вещества обычно характеризуется величиной удельной активности, т.е. активностью, приходящейся на единицу массы. Единицами концентрации являются Ки/г, Ки/кг, Бк/г, Бк/кг и т.п. Объемная концентрация в жидких или газообразных веществах обычно выражается в Ки/м<sup>3</sup>, Бк/м<sup>3</sup> (см<sup>3</sup>, мл, л и т. д.).

Для характеристики радиоактивного загрязнения территории используют основные единицы активности, отнесенные к единице площади: Ки/км<sup>2</sup> или Бк/м<sup>2</sup>,  $1 \text{ Ки/км}^2 = 3,7 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^2$ . Этими единицами измеряют плотность радиоактивного загрязнения.

*Единицы гамма-активности.* Единицы кюри и беккерель для характеристики гамма-активности источников непригодны. Для этих целей введена другая единица – эквивалент 1 мг радия (мг-экв, радия). *Миллиграмм-эквивалент радия* – это активность любого радиоактивного препарата, гамма-излучение которого при идентичных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы, как гамма-излучение 1 мг радия Государственного эталона при платиновом фильтре 0,5 мм.

Принято считать, что точечный источник в 1 мг (1мКи) радия, находящийся в равновесии с продуктами распада, после начальной фильтрации 0,5 мм платины создает в воздухе на расстоянии 1 см мощность дозы 8,4 Р/ч. Эта величина называется ионизационной гамма-постоянной радия и обозначается буквой  $K_\gamma$ . Гамма-постоянная радия принята за эталон мощности дозы излучения. С ней сравнивается  $K_\gamma$  всех других гамма излучателей. Существуют таблицы гамма-постоянных для большинства радиоактивных изотопов. Так, гамма-постоянная  $^{60}\text{Co}$  составляет 13,5 Р/ч. Сравнение гамма-постоянных радия и  $^{60}\text{Co}$  показывает, что 1 мКи  $^{60}\text{Co}$  создает дозу излучения в 1,6 раза большую, чем 1 мКи радия ( $13,5/8,4 = 1,6$ ). Иначе говоря, по создаваемой дозе излучения в воздухе 1 мКи  $^{60}\text{Co}$  эквивалентен 1,6 мКи радия, т. е.  $\gamma$ -излучение, испускаемое препаратом  $^{60}\text{Co}$  активностью 0,625 мКи создает такую же дозу излучения, что и 1 мКи радия.

Гамма-эквивалент изотопа  $M$  связан с его активностью  $A$  (мКи) через ионизационную гамма-постоянную соотношениями:

$$M = A \cdot K_\gamma / 8,4; A = M \cdot 8,4 / K_\gamma,$$

которые позволяют сделать переход от активности радиоактивного вещества, выраженной в мг-экв., радия к активности, выраженной в мКи и наоборот.

*Единицы измерения доз ионизирующего излучения.* Важнейшее свойство ядерного излучения – его способность вызывать ионизацию атомов и молекул, в связи с чем, его называют ионизирующим излучением. Биологическое действие рентгеновского или ядерного излучений на организм обусловлено ионизацией и возбуждением атомов и молекул биологической среды. На процесс ионизации и возбуждения излучения затрачивают свою энергию. В результате взаимодействия излучения с биологической средой живому организму передается определенная величина энергии. Ионизирующее излучение, которое пронизывает облучаемый объект, но не поглощается им, действия на него не оказывает.

Повреждений, вызванных в живом организме излучением, будет тем больше, чем больше энергии оно передаст тканям. Поэтому основная величина, характеризующая действие ионизирующего излучения является поглощенная доза.

*Поглощенная доза или доза излучения (D)* - величина энергии, переданная веществу на единицу массы или объема облучаемого вещества.

В связи с тем, что поглощенная доза расходуется на ионизацию среды, для ее измерения необходимо подсчитать число пар ионов, образующихся при облучении. Однако измерить ионизацию непосредственно в глубине тканей живого организма очень трудно. В связи с этим для количественной оценки рентгеновского или гамма-излучения, действующего на объект, определяют так называемую *экспозиционную дозу ( $D_0$ )*, которая характеризует ионизационную способность рентгеновского или гамма-излучения в воздухе. Зная величину экспозиционной дозы, можно с помощью соответствующих коэффициентов рассчитать значение поглощенной дозы. Экспозиционную дозу определяют по ионизирующему действию излучения в определенной массе воздуха и только при энергии рентгеновского и гамма-излучения от десятков кэВ до 3 МэВ.

За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят *кулон* на килограмм - Кл/кг (C/kg), т. е. такая экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения при которой сопряженная корпускулярная эмиссия в одном килограмме сухого воздуха производят ионы, несущие заряд в один кулон каждого знака.

На практике применяется принятая в 1928 г. внесистемная единица *рентген* - Р (R),  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг (воздуха)}$ , или  $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$ .

*Рентген* – экспозиционная доза, которая в  $1 \text{ см}^3$  (0,001293 г) при температуре  $0^\circ \text{C}$  и давлении 760 мм рт. ст. (1013 гПа) приводит к образованию  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов, несущих суммарный заряд в 1 электростатическую единицу электричества каждого знака, т. е. для воздуха рентген является поглощенной дозой.

При дозе ионизирующего излучения в воздухе равной 1 Р, поглощенная энергия в воздухе в расчете на 1 г составляет 88 эрг, в мягких тканях на 1 г 92-97 эрг.

Для корпускулярного излучения была предложена единица фЭР (физический эквивалент рентгена), однако она не получила практического применения.

В начале 50-х годов стало очевидно, что единица рентген не может обеспечить решение всех метрологических практических задач в радиологии задач. Помимо нее, необходимо универсальная (для любого вида ионизирующего излучения) единица, применяемая для определения физического эффекта облучения в любой среде, в частности в биологических тканях. Такой единицей стал *rad* – внесистемная международная единица поглощенной дозы.

Единица *rad* (*rad* – *radiation absorbed dose*) – поглощенная доза любого вида ионизирующего излучения, при которой в 1 г массы вещества поглощается энергия излучения, равная 100 эрг,  $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг}$ .

Введение единицы рад не исключает использование единицы измерения излучения в рентгенах. Единицей рентген пользуются для измерения поля излучения (или как говорят радиологи, падающего излучения), для количественной характеристики источников квантового излучения.

Поскольку при одной и той же энергии  $\gamma$ -квантов и заряженных частиц в 1 г разной по химическому составу биологической ткани поглощается различное количество энергии, поглощенную в тканях дозу измеряют в радах расчетным путем. По формуле:

$$D_{\text{рад}} = D_{\text{Р}} f, \text{ где}$$

$D_{\text{(рад)}}$  – поглощенная доза в радах;  $D_{\text{(Р)}}$  – экспозиционная доза в рентгенах в той же точке;  $f$  – переходный коэффициент, величина которого зависит от энергии излучения и от рода поглощающей ткани (атомного номера элементов и плотности).

Если в воздухе доза излучения в 1 Р энергетически эквивалентна 88 эрг/г, то поглощенная энергия для этой среды составит  $88 : 100 = 0,88 \text{ рад}$ . Таким образом, для воздуха поглощенная доза, равная 0,88 рад, соответствует экспозиционной дозе в 1 Р.

Переходный коэффициент  $f$  обычно определяют опытным путем на фантоме. Для воды и мягких тканей коэффициент  $f_{\text{мк}}$  округленно принят за единицу (фактически он составляет 0,93). Следовательно, поглощенная доза в радах численно почти равна соответствующей экспозиционной дозе в рентгенах. Для костной ткани коэффициент  $f_{\text{к}} = 2 - 5$ .

За единицу поглощенной дозы в Международной системе единиц принят *джоуль* на килограмм (Дж/кг), т.е. такая поглощенная доза, при которой в 1 кг массы облучаемого

вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Этой единице присвоено собственное название *грей* – Гр (Gy) в честь английского ученого С. Грея.  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$ .

В биологическом отношении важно знать не просто дозу излучения, которую получил облучаемый объект, дозу излучения, полученную в единицу времени. В одном случае суммарная доза, значительно превышающая смертельную дозу, но полученная в течение длительного периода времени, не только не приведет к гибели животного, но даже не вызовет у него лучевое поражение. В другом случае, доза меньше смертельной, но полученная в короткий отрезок времени, может вызвать лучевую болезнь различной степени тяжести. В этой связи введено понятие мощности дозы. *Мощность дозы* ( $P$ ) – это доза излучения  $D$ , за единицу времени  $t$  (секунду, минуту, час):

$$D = Pt; P = D/t$$

Чем больше мощность дозы  $P$ , тем быстрее растет доза излучения  $D$ .

Понятие мощности дозы относится как к экспозиционной, так и к поглощенной дозе. Для экспозиционной дозы системная единица – ампер на килограмм, А/кг, внесистемная единица рентген в час, (Р/ч) или рентген в минуту (Р/мин) и т. д.; для поглощенной дозы соответственно Гр/ч, мин, рад/ч, мин и т. д.

Как известно, различные виды ионизирующих излучений обладают неодинаковой ионизационной способностью. Следовательно биологический эффект различных видов ионизирующих излучений неодинаков, т.е. биологическое действие при облучении живых организмов зависит не только от дозы, но качества излучения, которое определяется линейной плотностью ионизации (линейная передача энергии – ЛПЭ), зависящая от вида ионизирующих излучений. Чем выше ЛПЭ, тем больше степень биологического повреждения. Для учета этого явления был введен коэффициент, учитывающий во сколько раз эффективность биологического действия данного вида излучения больше рентгеновского или гамма-излучения при одинаковой поглощенной дозе в тканях. Этот коэффициент называется коэффициентом относительной биологической эффективности (ОБЭ) или коэффициентом качества (КК). В Нормативах радиационной безопасности (НРБ-99/09) и Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99) данный коэффициент именуется как *взвешивающий коэффициент* ( $W_R$ ).

*Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы* ( $W_R$ ) – используются в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов (Табл.3).

Таблица 3

### Взвешивающие коэффициенты ( $W_R$ ) для разных видов излучения

Вид излучения	Величина ( $W_R$ )
Рентгеновское и гамма-излучения	1
Бета-излучения (электроны, позитроны) любых энергий	1
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Доза, учитывающая эффективность ионизирующего излучения в живых организмах называется *эквивалентная доза*.

*Эквивалентная доза* ( $H_{T,R}$ ) – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешенный коэффициент для данного вида излучения,  $W_R$ :

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}, \text{ где:}$$

$D_{T,R}$  – *поглощенная доза в органе или ткани T, а  $W_R$  – взвешивающий коэффициент для излучения R.*

При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения.

Внесистемной единицей эквивалентной дозы является бэр – биологический эквивалент рентгена,  $1 \text{ бэр} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг}$ . В СИ единица эквивалентной дозы – зиверт (Sv),  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ .

Из данного определения следует, если  $W_R = 1$ , то эквивалентная доза, равная 1 Зв формируется при поглощенной дозе 1 Гр. Если  $W_R \neq 1$ , эквивалентная доза создается при поглощенной дозе равной  $1 \text{ Гр} \cdot W_R$ .

Как правило, эквивалентную дозу используют только для целей радиационной безопасности до величин, не превышающих 0,25 Зв (25 бэр), при кратковременном воздействии излучения на биологический объект.

Необходимо так же знать, что одни органы или ткани более чувствительны к действию радиационного излучения, чем другие. Так, например, при равной эквивалентной дозе возникновение рака легких более вероятно, чем рака щитовидной железы, а облучение половых желез опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому в радиационных дисциплинах введено понятие *взвешивающий коэффициент для органов и тканей*.

Взвешивающие коэффициенты ( $W_T$ ) для тканей и органов при расчете эквивалентной эффективной дозы (НРБ – 99/2009)

Органы или ткань	Взвешивающий коэффициент( $W_T$ )
Гонады	0,20
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки поверхностей	0,01
Остальное	0,05

Умножив эквивалентные дозы всех органов и тканей на соответствующие коэффициенты (Табл. 4) и просуммировав их, получим эффективную эквивалентную дозу, отражающую суммарный эффект облучения для организма.

*Доза эффективная эквивалентная ( $E$ )* – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешенные коэффициенты:

$$E = \sum W_T H_T$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в органе или ткани  $T$ , а  $W_T$  – взвешенный коэффициент для органа или ткани  $T$ . Эквивалентная эффективная доза измеряется в зивертах.

Приведенные выше понятия описывают дозу, получаемую человеком индивидуально. Просуммировав индивидуальные эффективные эквивалентные дозы для данной группы людей за данный промежуток времени, можно прийти к понятию коллективной (популяционной) эффективной эквивалентной дозы, которая измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв).

Для оценки вероятного ущерба здоровью человека от воздействия какого-либо источника ионизирующего излучения рассчитывают ожидаемую (полную) *эффективную эквивалентную дозу*. Она выражается в зивертах и рассчитывается на 50 лет для взрослых и на 70 лет для детей (доза за жизнь). Принято считать, что доза за жизнь для современного человека составляет 0,1-0,3 Зв.



**Основные радиационные величины, соотношение между внесистемными единицами и единицами в СИ**

Физическая величина	Единица, ее наименование, обозначение (международное, русское)		Соотношение между единицами	
	единица в СИ	внесистемная	СИ и внесистемной	внесистемной и СИ
Активность радионуклида в источнике	беккерель (Bq, Бк)	Кюри (Ci, Ки)	$1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Доза экспозиционная	кулон на килограмм (C/kg, Кл/кг)	рентген (R, Р)	$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
Мощность экспозиционной дозы	ампер на килограмм (A/kg, А/кг)	рентген в секунду (R, Р/с)	$1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}$	$1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$
Доза поглощенная	грей (Gy, Гр)	рад (rad, рад)	$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$
Мощность поглощенной дозы	грей в секунду Gy/s, Гр/с)	рад в секунду (rad/s, рад/с)	$1 \text{ Гр/с} = 100 \text{ рад/с}$	$1 \text{ рад/с} = 0,01 \text{ Гр/с}$
Доза эквивалентная	зиверт (Sv, Зв)	бэр (rem, бэр)	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$	$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$
Мощность эквивалентной дозы	зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с)	бэр в секунду, (бэр/с)	$1 \text{ Зв/с} = 100 \text{ бэр/с}$	$1 \text{ бэр/с} = 0,01 \text{ Зв/с}$

Примеры расчетов перехода от внесистемных единиц к единицам СИ:

$$3000 \text{ Ки} = 3000 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 111 \cdot 10^{12} \text{ Бк} = 111 \text{ ТБк}$$

$$400 \text{ Р} = 400 \cdot 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} = 103,2 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/кг} = 103,2 \text{ мКл/кг}$$

$$50 \text{ Р/с} = 50 \cdot 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг} = 129 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг} = 12,9 \text{ мА/кг}$$

$$70 \text{ рад} = 70 \cdot 0,01 \text{ Гр} = 0,7 \text{ Гр}$$

$$40 \text{ рад/с} = 40 \cdot 0,01 \text{ Гр/с} = 0,4 \text{ Гр/с}$$

$$0,8 \text{ бэр} = 0,8 \cdot 0,01 \text{ Зв} = 0,008 \text{ Зв} = 8 \text{ мЗв}$$

$$3 \text{ мкбэр/ч} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01 \text{ Зв/ч} = 0,03 \cdot 10^{-6} \text{ Зв/ч} = 0,03 \text{ мкЗв/ч}$$

Примеры расчетов при переходе от единиц в СИ к внесистемным единицам:

$$4,5 \text{ мБк} = 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки} = 12,15 \cdot 10^{-8} \text{ Ки} = 1215 \text{ мкКи}$$

$$87,4 \text{ мКл/кг} = 87,4 \cdot 10^{-3} \cdot 3876 \text{ Р} = 338 \text{ Р}$$

$$0,115 \text{ мА/кг} = 115 \cdot 10^{-6} \cdot 3876 \text{ Р/ч} = 0,4 \text{ Р/ч}$$

$$3,2 \text{ Гр} = 3,2 \cdot 100 \text{ рад} = 450 \text{ рад}$$

$$60 \text{ мГр/ч} = 60 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ рад} = 0,006 \text{ Гр/ч}$$

$$0,05 \text{ Зв} = 0,05 \cdot 100 \text{ бэр} = 5 \text{ бэр}$$

$$15 \text{ мкЗв/ч} = 15 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \text{ бэр/ч} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ бэр/ч} = 15 \text{ мбэр/ч}$$

## Вопросы и задания

1. Механизм взаимодействия радиоактивных излучений с веществом.
  2. Особенности взаимодействия нейтронов с веществом. Типы нейтронов.
  3. Электромагнитные и корпускулярные виды ионизирующих излучений.
  4. Проникающая способность  $\gamma$  - излучения.
  5. Механизм передачи энергии заряженных частиц.
  6. Линейная передача энергии (ЛПЭ), единицы измерения, связь с коэффициентом качества (КК) излучения.
  7. Кривая Брегга.
  8. Редко и плотно ионизирующее излучение.
  9. Единицы измерения радиоактивности и их взаимосвязь.
- Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

## Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
4. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
5. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
6. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
7. *Тюменев Р.С., Бадрутдинов О.Р.* Радиоэкологические исследования окружающей среды. Методические указания для практических занятий студентов. Казань,1998.-28с.
8. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Казань: Издательство КГУ, 2009.-44с.
9. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
10. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
11. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.

## Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

### Лекция 3.

#### Методы обнаружения и регистрации ионизирующих излучений

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы обнаружения и регистрации радиоактивных излучений, принципы работы приборов и их устройство.

**Ключевые слова.** Счетчики Гейгера-Мюллера, сцинтилляция, полупроводниковые детекторы, радиометры, дозиметры.

##### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются вопросы к лекции и тесты

Радиоактивные излучения не воспринимаются органами чувств. Эти излучения могут быть обнаружены (детектированы) при помощи приборов и приспособлений, работа которых основана на физико-химических эффектах, возникающих при взаимодействии излучений с веществом.

В практике наиболее употребительны ионизационные детекторы излучений, которые измеряют непосредственные эффекты взаимодействия излучения с веществом – ионизацию газовой среды (ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера-Мюллера, а также коронные и искровые счетчики).

Другие методы предусматривают измерение, вторичных эффектов, обусловленных ионизацией, - фотографический, люминесцентный, химический, калориметрический и др.

*Ионизационные детекторы излучения.* Представляют собой заполненную воздухом или газом камеру с электродами для создания в ней соответствующего электрического поля (рис. 8).

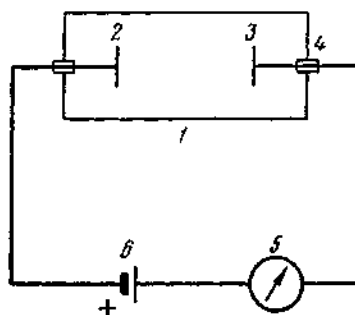


Рис. 8. Схема работы ионизационной камеры: 1- камера, заполненная воздухом или газом; 2 – анод; 3 – катод; 4 – изолятор; 5- прибор для измерения ионизационного тока камеры; 6- источник питания.

Заряженные частицы ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), попавшие в камеру детектора, производят непосредственно первичную ионизацию газовой среды;  $\gamma$ -кванты сначала образуют быстрые электроны (фотоэлектроны, комптонэлектроны, электрон-позитронные пары) в стенке детектора, которые затем вызывают ионизацию газовой среды в нем.

Сухой газ (воздух) – хороший электроизолятор, так как электрически нейтральные молекулы, из которых он состоит, не перемещают электрические заряды. Положение меняется, если в газовую среду попадают заряженные частицы. Они образуют ионные пары, и газ (воздух) становится проводником электрического тока.

При отсутствии напряжения на электродах все ионы, созданные начальной ионизацией, полностью рекомбинируют в нейтральные ионы. При возрастании напряжения, ионы под действием электрического поля обретают направленное движение; положительные ионы под действием собираются на катоде, а электроны – на аноде. В цепи возникает ионизационный ток, который может быть зарегистрирован прибором. Величина ионизационного тока служит мерой количества излучения.

С увеличением напряжения вероятность рекомбинации уменьшается, следовательно, возрастает сила ионизационного тока.

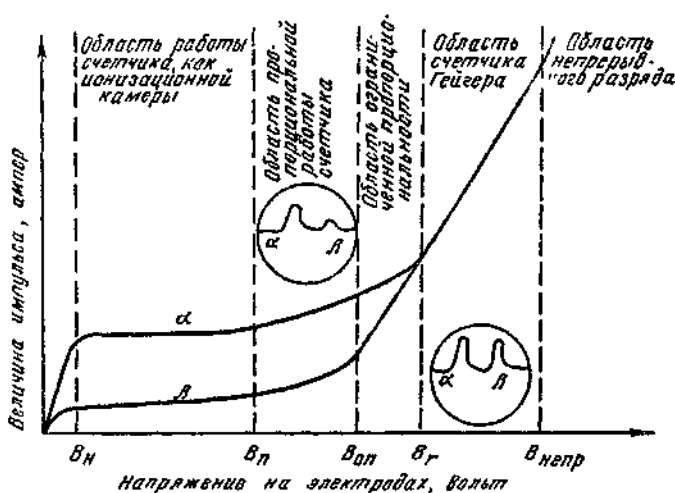


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика ионизационной камеры

На рис. 9 показана кривая зависимости силы ионизационного тока ( $I$ ) от напряжения ( $V$ ), приложенного к электродам детектора. Эта кривая называется вольт-амперной характеристикой ионизационного детектора.

Начиная с некоторого напряжения ( $V_n$ ), наступает момент, когда все ионы, образованные излучением, доходят до электродов и при увеличении напряжения

ионизационный ток не возрастает. Область, обозначенная на графике  $B_n - B_n$ , в которой сила ионизационного тока остается постоянной, называется *областью тока насыщения*.

В этом режиме работают ионизационные камеры. Сила ионизационного тока в области тока насыщения зависит величины первичной ионизации, т. е. числа первичных пар ионов, создаваемых ядерным излучением в камере детектора. Поэтому ионизационный ток от гамма-излучения меньше, чем бета-излучения. Более сильный он от  $\alpha$ -частиц, так как плотность ионизации альфа-излучения на 2 - 3 порядка выше, у двух первых.

При дальнейшем увеличении напряжения  $B_n - B_{on}$  сила ионизационного тока вновь начинает возрастать, поскольку ионы, образованные излучением, приобретают при движении к электродам (особенно электроны) ускорения, достаточные для того, чтобы самим производить ионизацию вследствие соударений с атомами и молекулами газовой среды детектора (газовое условие). Этот процесс называется ударной (вторичной) ионизацией. Чем больше напряжение, тем большую энергию приобретают ионы и, следовательно, тем больше пар ионов они создают в процессе ударной ионизации.

В области напряжений  $B_n - B_{on}$  существует строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и общей суммой ионов, участвующих в создании ионизационного тока. Эта область напряжений называется *областью пропорциональности*. В этом режиме работают пропорциональные счетчики.

Коэффициент газового усиления (Кгу)\* в режиме пропорциональности может достигать  $10^3$ - $10^4$ . При дальнейшем усилении напряжения  $B_{on} - B_c$  строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и силой ионизационного тока нарушается. Поэтому данная область получила название ограниченной пропорциональности.

При еще больших значениях напряжения сила ионизационного тока уже не зависит от числа первично образованных ионов. Газовое усиление настолько возрастает ( $КГУ \approx 10^8$ - $10^{10}$ ), что при появлении в камере детектора хотя бы одной любой ядерной частицы любой энергии происходит вспышка самостоятельного газового разряда, который охватывает всю камеру детектора. (Коэффициент газового усиления КГУ – это соотношение общей суммы ионов ( $n$ ), создающих ионизационный ток, к числу первично образованных ионов ( $n_0$ ):  $КГУ = n/n_0$ ). Область напряжений  $B_c - B_{непр}$ , при которых в детекторе возникает самостоятельный разряд, который называется *областью Гейгера*. В этом режиме работают счетчики Гейгера-Мюллера.

Если продолжать увеличивать напряжение (выше значения  $B_{непр}$ ), то детектор перейдет в область постоянного коронного распада – непрерывного разряда, который не

прекращается при удалении источников ионизирующих излучения. В этом случае детектор выходит из строя. Это положение необходимо учитывать при работе с газоразрядными счетчиками.

### **Ионизационная камера**

Это один из распространенных детекторов излучения. Ее применяют для измерения всех типов ядерных излучений. По конструктивному оформлению ионизационные камеры могут быть плоские, цилиндрические и сферические с объемом воздуха 0,5-5 л. Есть миниатюрные ионизационные камеры - наперстковые, смонтированные в футляре, по форме похожие на авторучку. Их используют как индивидуальные дозиметры (ДК-02, КИД-1 и КИД-2, ДП-22В, ДП-24 и др.). Воздушный объем таких камер колеблется от нескольких кубических сантиметров до их долей.

Камеры с большим объемом более чувствительны, поэтому для измерения малых доз излучения используют камеры с большим объемом.

В плоской ионизационной камере электроды имеют вид пластин. Они заключены в корпус и разделены газовым слоем. Цилиндрическая ионизационная камера состоит из полого цилиндра, по оси которого расположен металлический стержень – собирающий электрод. Высокое напряжение подводят к собирающему электроду, а цилиндрический корпус заземляют. Собирающий электрод всегда хорошо изолирован и обычно снабжается заземленным охранным кольцом, препятствующим проникновению токов утечки от высоковольтного электрода. Охранное кольцо в значительной степени снижает требования к материалам электроизоляции и повышает точность измерения. Высокочувствительные цилиндрические камеры измеряют ионизационный ток до  $10^{-14}$ - $10^{-15}$  А.

Для работы ионизационной камеры существенны: материал, толщина стенок, величина и форма камеры, природа и состояние наполняющего газа, пространственное распространение излучения в камере и способ измерения ионизационного тока. Обычно в стенке камеры изготавливают из воздухоэквивалентного материала, 1 г которого поглощает такую же энергию, как 1 г воздуха при одинаковых условиях облучения. Такими материалами служат органические пластмассы: плексиглас, бакелит, резит, полистирол и т.п. Толщина стенок составляет 2-4 мм. Ток насыщения, в режиме которого работают ионизационные камеры, достигается при напряжении 150-300 В.

Ионизационные камеры в зависимости от назначения и конструкции могут работать в импульсном и интегральном режимах. Импульсные камеры используют для регистрации отдельных тяжелых заряженных частиц ( $\alpha$ -частиц, протонов, ядра различных элементов и т. д.). Удельная ионизация легких частиц (электронов, позитронов) сравнительно мала,

поэтому регистрация их в импульсном режиме неэффективна. Токовые камеры принимают для измерения интенсивности всех типов излучения, которые пропорциональны среднему току, проходящему через камеру. Поскольку величина ионизационного тока пропорциональна энергии излучения, то ионизационные камеры измеряют ток насыщения в единицу времени, т.е. мощность дозы данного излучения. Поэтому они могут быть отградуированы в единицах мощности дозы. Следовательно, ионизационные камеры могут быть использованы не только для измерения дозы излучения, но и ее мощности.

Более подробно характеристики ионизационных камер изложены в технических инструкциях по их эксплуатации, с которыми студенты знакомятся на практических занятиях.

*Пропорциональные счетчики.* Отличаются от ионизационной камеры тем, что начальное усиление первичной ионизации происходит внутри самого счетчика (коэффициент газового усиления  $= 10^3-10^4$ ). Использование газового усиления в пропорциональных счетчиках дает возможность значительно повысить чувствительность измерений и упростить схему усиления сигнала по сравнению с ионизационными камерами. Наличие пропорционального усиления в счетчиках позволяет определить энергию Ядерных частиц и изучить их природу.

Как правило, пропорциональный счетчик делают в виде цилиндра, вдоль оси которого натягивают металлическую нить – анод. Проводящее покрытие внутренней поверхности цилиндра служит катодом. При таком устройстве все электрическое поле сосредотачивается около нити и его максимальное значение оказывается тем выше, чем меньше радиус нити. Поэтому необходимые для газового усиления большие напряженности полей удастся получить при сравнительно небольших разностях потенциала между корпусом счетчика и нитью. В электрическую сеть пропорциональный счетчик включают так же, как ионизационную камеру.

Пропорциональные счетчики изготавливают и торцевого типа, например САТ-7 и САТ-8 (счетчик  $\alpha$ -частиц торцевой). Чтобы обеспечить проникновение в полость счетчика  $\alpha$ -частиц, входное слюдяное окно делают очень тонким (4-10 мкм). Наполняют счетчик смесью неона с аргоном почти до уровня атмосферного давления. Есть счетчики открытые, рабочая полость которых сообщается с внешним воздухом. Такие счетчики работают при атмосферном давлении, они допускают непрерывное протекание или циркуляцию наполняющего их газа и поэтому их используют для регистрации активности газовых проб.

В целях эффективности регистрации излучений пропорциональные счетчики иногда делают в виде плоских многонитевых детекторов. Такого типа счетчики применены в одном

из датчиков радиометра ТИСС. Пропорциональные счетчики в большинстве случаев используются для регистрации  $\alpha$ -частиц.

### Счетчики Гейгера-Мюллера

Счетчики Гейгера-Мюллера (газоразрядные счетчики), конструктивно мало отличаются от пропорциональных счетчиков цилиндрического и торцевого типа (рис. 10).

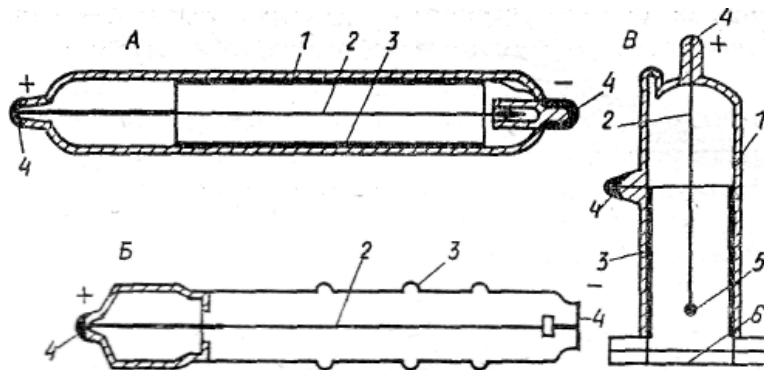


Рис. 10. Схема устройства газоразрядных счетчиков:

А – цилиндрический со стеклянными стенками для регистрации  $\gamma$ -излучения; Б – цилиндрический с металлическими стенками для регистрации жесткого  $\gamma$ -излучения; В – торцевой счетчик. 1 – стеклянный баллон; 2 – анод (вольфрамовая нить); 3 – катод (металлический цилиндр); 4 – колпачки выводов; 5 – стеклянная бусинка; 6 тонкое слюдяное окно.

Основное различие состоит в том, что внутренний объем счетчика Гейгера заполнен инертным газом при пониженном давлении (15-75 гПа), а работа осуществляется в области Гейгера, т. е. в режиме самостоятельного газового разряда (см. рис. 9).

Рассмотрим механизм газового разряда в счетчиках несамогасящихся и самогасящихся. При попадании ядерной частицы в счетчик происходит первичная ионизация газовой среды. Образовавшиеся положительные ионы движутся к катоду – к стенке счетчика, электроны к аноду – к нити. Малая площадь анода по сравнению с поверхностью катода создает в области нити большую плотность силовых линий, поэтому, здесь напряженность электрического поля достигает величин области Гейгера.

Под влиянием высокой разности потенциалов между электродами и пониженного давления в счетчике электроны, движущиеся к центральному электроду (аноду), приобретают большие ускорения и производят ударную вторичную ионизацию. Новые ионы, в свою очередь, приобретают скорость, при которой они способны вызвать ионизацию. Одновременно с ударной ионизацией дополнительным источником электронов становятся образовавшиеся положительные ионы.



Двигаясь с большим ускорением к катоду, они выбивают из стенки счетчика значительно больше электронов, чем необходимо для нейтрализации положительных ионов. Эти электроны еще больше увеличивают лавинный эффект. Кроме того, в результате соударений атомов и молекул газовой среды с быстро движущимися ионами происходит возбуждение атомов и молекул, которое сопровождается испусканием ультрафиолетового излучения, способного также вызывать ионизацию. Эффект первоначальной единичной ионизации увеличивается во много раз; в результате чего весь чувствительный объем счетчика охватывает разрядом. Коэффициент газового усиления может достигать  $10^8$ - $10^{10}$ .

Если во время быстро нарастающей вторичной ионизации в счетчик проникает следующая ядерная частица, то она не будет зарегистрирована счетной установкой, поскольку произведенная этой частицей ионизация не изменит имеющуюся картину. Для обнаружения второй ядерной частицы необходимо «погасить» процесс ионизации от первой, что достигается либо включением в электрическую сеть высокого сопротивления (у несамогасящихся счетчиков), либо введением в счетчик органических паров (самогасящиеся счетчики). Обычно применяют пары многоатомных спиртов в соотношении 90% аргона и 10% паров спирта. Органическая добавка (гасящий компонент) обеспечивает нейтрализацию положительных ионов аргона путем отдачи слабосвязанных электронов, а также поглощение квантов ультрафиолетового излучения, выбивающих из стенок счетчика электроны. Таким образом, молекулы многоатомного газа (пары спирта) приостанавливают вторичную ионизацию («гасят» разряды), и счетчик становится готовым к регистрации следующей частицы.

Время, в течение которого счетчик не может зарегистрировать попавшую в него частицу (квант), называется мертвым временем счетчика. Мертвое время самогасящихся счетчиков составляет  $10^{-4}$  с.

Время, в продолжение которого счетчик способен регистрировать частицы (кванты) раздельно, характеризует его разрешающую способность. Несамогасящиеся счетчики способны раздельно регистрировать не более  $10^2$ - $10^3$  имп/с, самогасящиеся – до  $10^4$  имп/с. В настоящее время самогасящиеся счетчики, обладающие высокой эффективностью счета, полностью вытеснили несамогасящиеся.

Под *эффективностью счета* понимают процентное соотношение числа зарегистрированных счетчиком импульсов к общему числу частиц (квантов), попавших за этот же отрезок времени в рабочий объем счетчика. Эффективность счета определяют путем измерения излучения радиоактивных препаратов с известной активностью (эталонов).

В процессе работы счетчика пары спирта гасящей добавки диссоциируют на более простые радикалы, что приводит к изменению состава газовой смеси и ухудшению ее гасящих свойств. Поэтому счетчик со временем выходит из строя. Обычно это случается после регистрации  $10^3$ - $10^9$  ядерных частиц. Чтобы продлить срок работы счетчика, не следует подавать излишне высокие напряжения. Для этого необходимо перед началом работы снять счетную характеристику и определить рабочее напряжение счетчика.

*Счетная характеристика* выражает зависимость скорости счета (сила имп/мин) от напряжения, приложенного к счетчику. Область напряжений, в которой устанавливается постоянство скорости счета в единицу времени, получила название «плато счетчика» (рис. 11). Чем больше протяженность и меньше наклон плато, тем лучше работает счетчик.

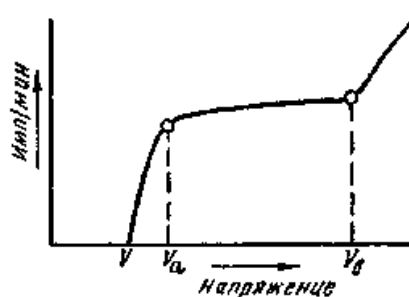


Рис. 11. Счетная характеристика счетчика Гейгера – Мюллера:  
V – начало счета;  $V_a - V_b$  – плато счетчика.

Чем больше протяженность и меньше наклон плато, тем лучше счетчик. В самогасящихся счетчиках протяженность плато достигает 200-300 В, наклон плато 3-5% и 12-15% для цилиндрических счетчиков на каждые 100 В. Рабочее напряжение обычно выбирают на расстоянии 1/3 от начала плато.

Счетчики Гейгера – Мюллера применяются для регистрации всех видов излучений, но чаще для бета- и гамма-излучений. Конструкция счетчиков определяется теми задачами, которые они призваны решать. Для счета  $\alpha$ -  $\beta$ - частиц малых энергий – 0,1-0,2 МэВ – применяются торцевые счетчики типов МСТ-17, Т-25 БФЛ, СБТ и др. с тонким входным отверстием (1-5 мг/см<sup>2</sup>).

Для обнаружения бета-излучений средней и большой энергии используют цилиндрические счетчики типов СТС-5, СТС-6, АС-1 и др., имеющие стенки из нержавеющей стали и алюминия, толщиной 40-45 мг/см<sup>2</sup>.

Счетчики для регистрации гамма-излучения имеют некоторую особенность в конструкции. Регистрация гамма-излучения возможна в результате выбивания вторичных электронов из катода счетчика на основе известных трех механизмов взаимодействия данного излучения с веществом: фотоэффекта, комптонэффекта, образование электронно-позитронных пар. Вторичные электроны (фотоэлектроны, электроны отдачи, электронно-позитронные пары), попадая в чувствительный объем счетчика, вызывают газовый разряд (ударную ионизацию), который и регистрируется радиометрическим устройством. В силу того, что  $\gamma$ -кванты слабо поглощаются веществом, эффективность гамма-счетчика очень мала и не превышает 1%. Для повышения эффективности счета  $\gamma$ -квантов стенки гамма-счетчиков делают из материалов с большим атомным номером и более толстыми (с учетом величины максимального пробега вторичных электронов в данном веществе). Промышленные гамма-счетчики, как правило, цилиндрические и имеют стеклянные стенки. Катодом у них служит напыленный на внутреннюю поверхность стекла слой графита, меди, никеля или вольфрама. Наполнитель – смесь аргона и паров спирта. В практической работе применяют счетчики ГС, МС-4, МС-6, МС-17, ВС-7, ВС-9 и др., длина и диаметр которых варьирует в широких пределах от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

Отдельную группу составляют так называемые *галогенные счетчики*, у которых в качестве гасящего компонента применяют галоиды. Добавка незначительного количества ( $\sim 0,1\%$ ) таких двухатомных газов как  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{I}_2$ , к неону или аргону резко снижает начальный потенциал «зажигания» самостоятельного разряда и делает эти счетчики самогасящимися. Низкое рабочее напряжение (300-400 В) позволяет применять галогенные счетчики для измерений в нестационарных полевых условиях. В качестве источника питания можно использовать сухие батареи. Преимущество галогенных счетчиков состоит еще и в том, что срок службы практически не ограничен, так как «гашение» разряда не связано с диссоциацией молекул галоида. Однако галогенные счетчики имеют и существенный недостаток – короткое плато счетной характеристики ( $\sim 80$  В) с большим наклоном (12-15% на 100 В). Это ограничивает применение галогенных счетчиков для точных измерений радиоактивных образцов.

В настоящее время промышленность выпускает несколько типов галогенных счетчиков СИ -1Г, СИ-1БГ, СИ-3БГ, СБТ-7 и др.

### **Сцинтилляционный (люминесцентный) метод регистрации излучений**

В некоторых веществах (сцинтилляторах) под действием излучений происходят ионизация и возбуждения атомов. При переходе атомов из ионизированного и

возбужденного состояний в основном высвечивается энергия в виде вспышки света (сцинтилляция), которая может быть зарегистрирована различными способами. Лучший из них состоит в преобразовании энергии света в электрический сигнал с помощью оптически связанного со сцинтиллятором фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Фотоэлектронный умножитель совмещает свойства фотоэлемента и усилителя тока с большим коэффициентом усиления ( $10^6$ - $10^9$ ). ФЭУ состоит из фотокатода, анода и диодов (эмиттеров) либо покрытых сурьмяно-цезиевой смесью, либо изготовленных из специальных сплавов алюминия, магния и серы, обладающих большим коэффициентом вторичной эмиссии электронов. Вся система ФЭУ размещена в стеклянном баллоне с вакуумом, необходимым для сохранения поверхностей фотослоя и диодов, а также для свободного движения электронов.

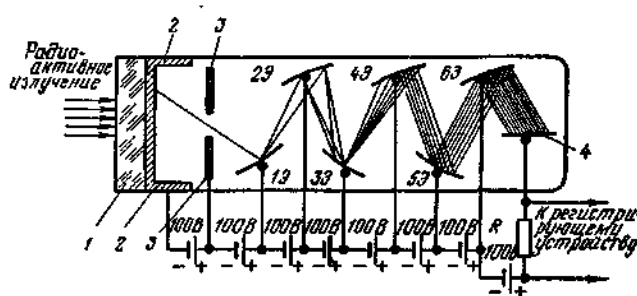


Рис. 12. Схема устройства сцинтиляционного счетчика:

1 – кристалл 2 – фотокатод; 3 – фокусирующий электрод; 4 – анод; 1Э–6Э – эмиттеры (диоды).

В сцинтиляционном счетчике ФЭУ работает в импульсном режиме. Под действием светового импульса, возникающего в сцинтилляторе, из фотокатода за счет фотоэффекта выбиваются электроны, которые собираются электрическим полем и направляются на первый эмиттер (диод), ускоряясь до энергии, достаточной для выбивания вторичных электронов из следующего эмиттера (рис. 12).

Умножение числа электронов происходит при попадании потока первичных электронов на эмиттер. Выбитые при ударе электроны фокусируются на последующий диод из которых они вновь выбивают примерно одинаковое количество электронов и т.д. Таким образом, лавина электронов возрастает от катода к аноду; происходит преобразование очень слабых световых вспышек, возникающих в сцинтилляторе и регистрируемые затем в электрические импульсы.

Сцинтилляционные счетчики обладают более высокой эффективностью счета (до 100%) и разрешающей способностью по сравнению с газоразрядными счетчиками. Разрешающая способность сцинтилляционных счетчиков достигает  $10^{-5}$  с при регистрации  $\alpha$ -частиц и  $10^{-8}$  с при регистрации  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов. Однако указанные характеристики зависят от применяемого сцинтиллятора (фосфора).

По составу сцинтилляторы делят на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию – на твердые, пластические, жидкие и газовые.

Из неорганических сцинтилляторов для регистрации бета- и гамма-излучений удобно использовать йодистый натрий (цезий), активированный таллием – (NaI), а также вольфрамат кальция –  $\text{CaWO}_4$ , поскольку они могут быть получены в виде больших прозрачных монокристаллов. Для регистрации нейтронов применяют сцинтилляторы на основе йодистого лития – Li (Sn), а тяжелых частиц ( $\alpha$ -частиц, осколков деления) – сцинтилляторы на основе сернистого цинка (кадмия), активированного серебром ZnS (Ag). Сернистый цинк и сернистый калий представляют собой кристаллики, которые обычно наносят тонким слоем на кристалльную подложку, так как только слои таких кристаллических порошков прозрачны для светового излучения. Неорганические сцинтилляторы обладают довольно большим временем высвечивания (большое мертвое поле),  $\sim 10^{-6}$  с.

Из органических сцинтилляторов используют монокристаллы антрацена ( $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ ), стиблена ( $\text{C}_{14}\text{H}_{12}$ ), пара-терфинила ( $\text{C}_{14}\text{H}_{14}$ ) и др.; твердые пластмассы (твердые растворы сцинтилляторов на основе полистирола и поливинилтолуола), жидкие фосфоры (например раствор терфинила) и инертные газы – гелий, аргон, неон и др. Органические и газовые сцинтилляторы характеризуются очень малым временем высвечивания ( $10^{-8}$ - $10^{-9}$ ).

Весь сцинтилляционный счетчик (сцинтиллятор, световод и ФЭУ) заключен в светонепроницаемый кожух, чтобы исключить попадание постороннего света на фотокатод и диноды ФЭУ. Умножитель также заключен в светонепроницаемый кожух для защиты от внешних электрических и магнитных полей, которые нарушают фокусировку электронов.

### **Полупроводниковые детекторы (ППД) ионизирующих излучений**

Данные типы детекторов представляют собой твердотельную ионизационную камеру, в которой роль носителей электрического заряда выполняют электроны и так называемые дырки. Действие ППД основано на свойствах полупроводников проводить электрический импульс под действием ионизирующего излучения. Из всех полупроводников наиболее пригодны для детектирования монокристаллы германия и кремния.

Достоинство ППД состоит в том, что их можно изготавливать очень малых размеров, поскольку толщина рабочего слоя измеряется десятками или сотнями микрон, а полезная площадь может составлять около  $1 \text{ см}^2$ . Вместе с тем они имеют и недостатки. Электропроводность ППД изменяется при нагревании, поэтому во время детектирования измерений полупроводник надо охлаждать жидким азотом.

К методам регистрации излучений, основанным на вторичных эффектах взаимодействия их с веществом, относятся фотографический, химический и калориметрический. Последний применяют главным образом при измерении больших доз (порядка сотен тысяч или миллионов рентген) и мощных потоков ионизирующих излучений. Поэтому применение его в медицинской, биологической, экологической, сельскохозяйственной практике ограничено.

### **Фотографический, химический и калориметрический методы регистрации**

*Фотографический метод* регистрации исторически был первым способом обнаружения ядерных излучений, позволившим открыть радиоактивность. Он основан на том, что излучение, взаимодействуя с галогенидами серебра ( $\text{AgBr}$  или  $\text{AgCl}$ ) фотоэмульсии, восстанавливает металлическое серебро подобно видимому свету, которое после проявления выделяется в виде почернения.

Степень почернения фотоэмульсии (фотопластинки) пропорциональна дозе излучения. На этом принципе основан получивший широкое распространение индивидуальный дозиметрический фотоконтроль (ИФК) для лиц, работающих с бета- и гамма-излучением.

В настоящее время фотографический метод широко применяется в ядерной физике при исследовании свойств самых различных заряженных частиц и их взаимодействий в ядерных реакциях. Для этих целей были созданы специальные толстослойные фотопластинки. Фотографический метод дает хорошие результаты при абсолютных измерениях небольших активностей. В биологии он сформировался в специальный метод называемый автордиографией.

*Химический метод.* При этом методе регистрации излучений учитываются те или иные химические изменения, возникающие под влиянием излучения (например, изменения цвета растворов или кристаллических тел, выделение газов, осаждение некоторых коллоидов и т. п.), степень изменения пропорциональна поглощенной энергии излучения.

В настоящее время широкое распространение получил ферросульфатный дозиметр, основанный на окислении под воздействием излучений двухвалентного иона железа  $\text{Fe}^{2+}$  в трехвалентный ион  $\text{Fe}^{3+}$ . При поглощении 199 эВ энергии ионизирующего излучения

образуется 15,6 иона  $\text{Fe}^{3+}$ . Концентрацию образованных ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в молях на литр раствора определяют на спектрометре. Максимальный предел измерения дозы до 50 000 Р.

Часто применяют также цериевый дозиметр. Концентрацию  $\text{Ce}^{4+}$  определяют до и после облучения спектрометрически или титрованием. Измерение дозы возможно до 12 000 000 Р.

Под воздействием излучений изменяется молекулярный состав газов. Этим пользуются в газовых дозиметрах.

Некоторые прозрачные пластмассы (полистирол, полиметилметакрилат и др.) и сорта стекол (фосфатные, активированные серебром) темнеют под воздействием бета- гамма-излучений. Коэффициент поглощения света для них растет линейно с увеличением дозы. Дозу измеряют до  $2 \cdot 10^8$  Р.

*Калориметрический метод* основан на измерении с помощью специальных калориметров тепловой энергии, выделяющейся при поглощении энергии излучения в веществе.

### **Методы измерения радиоактивности**

Активность радиоактивных веществ можно определить абсолютным, расчетным и относительным (сравнительным) методами. Наиболее широкое применение в практике приобрел последний метод.

*Абсолютный метод.* Метод основан на применении прямого счета полного числа частиц распадающихся ядер в условиях 4 $\pi$ -геметрии (четырехпийной). В этом случае активность препаратов выражается не в импульсах в минуту, а в единицах радиоактивности – Бк, Ки. Для этих целей используют 4 $\pi$ -счетчики, конструкция которых позволяет поместить измеряемый образец внутрь счетчика (газопроточный счетчик типа СА-4БФЛ, жидкостной сцинтилляционный счетчик с растворением пробы в жидком сцинтилляторе или помещением пробы внутрь его и др.). При работе с 4 $\pi$ - счетчиком отпадает необходимость введения 4 $\pi$ -поправок как при расчетном методе.

*Расчетный метод.* Принцип метода основан на определении абсолютной активности альфа- и бета-излучающих изотопов, заключающегося в том, что измерение осуществляется при помощи обычных газоразрядных или сцинтилляционных счетчиков.

Чтобы сопоставить скорость счета, выраженную в импульсах в минуту, с активностью в единицах Кюри или Беккерель вводят в результаты измерения ряд поправочных коэффициентов, учитывающих потери излучения при радиометрии.

Общая формула для определения абсолютной активности ( $A$ ) расчетным методом имеет следующий вид:

$$A = N/\omega \cdot \varepsilon \cdot k \cdot p \cdot q \cdot r \cdot \gamma \cdot m \cdot 2,22 \cdot 10^{12} \text{ Ки},$$

где  $N$  – скорость счета в имп/мин за вычетом фона;  $\omega$ - поправка на геометрические условия измерения (телесный угол);  $\varepsilon$ - поправка на разрешающее время счетной установки;  $k$ - поправка на поглощение излучения в слое воздуха и окне (стенке) счетчика;  $p$ - поправка на самопоглощение в толще препарата;  $q$ - поправка на обратное рассеяние от подложки;  $r$ - поправка на схему распада;  $\gamma$ - поправка на гамма-излучение при смешанном бета-, гамма-излучении;  $m$ - масса навески измеряемого препарат в мг,  $2,22 \cdot 10^{12}$  – переводной коэффициент от числа распадов в минуту к кюри ( $1 \text{ Ки} = 2,22 \cdot 10^{12} \text{ расп/мин}$ ).

Для определения удельной активности указанная формула принимает следующее выражение:

$$A = N \cdot 10^5 / \omega \cdot \varepsilon \cdot k \cdot p \cdot q \cdot r \cdot \gamma \cdot m \cdot 2,22 \cdot 10^{12} \text{ Ки/кг},$$

где  $N \cdot 10^5$  – переводной коэффициент на 1 кг при измерении  $m$  в мг.

Большую часть поправочных коэффициентов выводят путем расчета, что и составляет основную трудность этого метода. В настоящее время в связи с развитием прикладной ядерной физики, измерительной техники и создания программного обеспечения для персональных ЭВМ в области измерения радиоактивности данный метод, как правило, в практике радиоэкологического мониторинга объектов окружающей среды не применяется.

*Относительный (сравнительный) метод определения радиоактивности.* Метод основан на сравнении исследуемого препарата с активностью стандартного препарата (эталоны), содержащего известное количество изотопа. Достоинство относительных измерений в их простоте, оперативности и удовлетворительной достоверности.

Благодаря этому методу относительный метод нашел широкое применение в практической радиометрии и в научных исследованиях с использованием радиоактивных изотопов.

Для правильного проведения измерений относительной активности исследуемых препаратов необходимо, чтобы схема распада, вид и энергия излучения эталона существенно не отличались от исследуемого радионуклида. Идеальным эталоном был бы радиоизотоп, одноименный с изотопом, содержащимся в измеряемом препарате.

Желательно иметь для эталона долгоживущий радиоактивный изотоп, так как его можно использовать длительное время без внесения поправок на распад. При определении суммарной бета – активности в качестве эталона применяют  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{234}\text{Th}$  и др. Для определения альфа-активности  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{148}\text{Gd}$  и др. Эталон и исследуемые препараты должны иметь одинаковую форму, площадь и толщину активного слоя, их



одинаково располагают относительно счетчика. Подложки, на которые нанесены измеряемые препараты и эталон, должны быть выполнены из одинакового материала и иметь одинаковую толщину. Все измерения проводятся на одной установке с одним и тем же счетчиком. Следует стремиться к тому, чтобы измерения всех препаратов были выполнены с одинаковой статистической точностью.

Измерив, скорость счета  $N_z$  от эталона и препарата  $N_{np}$  рассчитывают активность препарата в распадах в минуту по формуле:

$$A_{np} = A_z N_{np} / N_z$$

### **Приборы для измерения излучений**

Приборы для измерения ионизирующих излучений можно условно разделить на три категории:

- *радиометрические (радиометры);*
- *дозиметрические (дозиметры);*
- *блоки и устройства электронной аппаратуры для ядерно-физических исследований.*

Отечественная и зарубежная промышленность выпускает много различных типов радиометрических и дозиметрических приборов и установок, которые могут быть классифицированы:

- *по способу регистрации излучений (ионизационные, сцинтилляционные, фотодозиметрические и др.);*
- *виду регистрируемого излучения (для тяжелых заряженных частиц, бета и гамма-излучений и т.д.);*
- *источнику питания (сетевые, батарейные, аккумуляторные);*
- *назначению.*

Следует иметь в виду, что приведенная классификация в известной мере условна, поскольку некоторые приборы могут быть использованы не только по своему прямому назначению. Кроме того, к настоящему времени в ядерном приборостроении и специальной литературе еще не установлена единая терминология и классификация приборов и установок.

*Радиометры.* Это приборы с газоразрядными, сцинтилляционными счетчиками и другими детекторами, предназначенные для измерения активности радиоактивных препаратов и источников излучений, для определения плотности потока или интенсивности ионизирующих частиц и квантов, поверхностной радиоактивности предметов, удельной активности аэрозолей, газов, жидкостей.

Для более точных измерений активности препаратов и потоков частиц применяют *стационарные радиометры*, которые осуществляют дискретный счет попавших в детектор частиц и квантов (дифференцированные измерения). Стационарный радиометр состоит, как правило, из детектора – датчика импульсов, импульсного усилителя, пересчетного прибора, счетного устройства, источника высокого напряжения для питания детектора и источника питания всей аппаратуры.

К таким приборам относятся, например, ранее выпускавшиеся радиометры Б-2, Б-3, Б-4, а также технически более совершенные радиометры ПП-8, РПС-2-03Т и др., работающие с газоразрядными и сцинтилляционными счетчиками.

*Переносные (полевые) радиометры.* Данные радиометры имеют малые габариты и автономное питание (батарейное) питание. Они содержат более простое электронное устройство, позволяющее проводить измерения при помощи стрелочного прибора (интегральные измерения). При облучении детектора отклонение стрелки выходного прибора (микроамперметра) показывает значение средней скорости счета в имп/с. Такие устройства называют измерителями скорости счета или интенсивметрами. По точности измерений переносные приборы, содержащие интегрирующую схему, уступают стационарным пересчетным прибором.

*Дозиметры (рентгенометры).* Эти приборы измеряют экспозиционную и поглощенную дозы излучения или соответствующие мощности доз. Дозиметры состоят из трех основных частей: детектора, радиотехнической схемы, усиливающей ионизационный ток, и регистрируемого (измерительного) устройства.

По принципу действия дозиметры можно разделить на две группы. Первую группу составляют дозиметры, измеряющие мощность дозы в рентгенах в единицу времени, так называемые измерители мощности дозы. Ко второй группе относят интегрирующие дозиметры, измеряющие дозу излучения за какой-либо промежуток времени.

Детекторы излучения в измерителях мощности дозы могут быть ионизационные камеры, газоразрядный или сцинтилляционный счетчики.

В качестве детектора в интегрирующих приборах обычно применяют ионизационные камеры.

По характеру применения дозиметры делят на стационарные и переносные и приборы индивидуального дозиметрического контроля.

Стационарные дозиметры применяют обычно в лабораторных условиях. К ним, например, относится дозиметр сетевого питания «Кактус», предназначенный для измерения

мощности гамма-излучения. Такие дозиметры используются, как правило, на предприятиях где проводятся работы с источниками ионизирующих излучений и на объектах ЯТР.

К группе приборов индивидуального дозиметрического контроля относят комплексы типа КИД-1, КИД-2, ДК-0,2, ДП-23-А, ДП-24 и др., которые снабжены переносным зарядным устройством. Указанные дозиметры предназначены для контроля при работе с рентгеновским и гамма-излучением. Они состоят из комплекса малогабаритных (наперстковых) ионизационных камер, внешне напоминающих авторучку. Носят их обычно в нагрудном кармане халата (карманные дозиметры).

Принцип работы дозиметров основан на разрядке емкости, предварительно заряженной камеры в результате действия ионизирующего излучения.

Величина емкостей и воздушные объемы камер у КИД-1 подобраны таким образом, что обеспечивает диапазоны измерений в пределах 0,02-0,2 Р и 0,2-2Р, у КИД-2 - 0,005-0,05 Р и 0,05-1 Р. Остаточное напряжение на камере измеряют ламповым вольтметром, который вместе с устройством для зарядки камер составляет схему зарядно-измерительного устройства.

Комплект ДК- 0,2 состоит из 10 дозиметров и зарядного устройства. В отличие от КИД-1 и КИД-2 он позволяет визуально судить о дозе излучения в процессе работы в любой момент по положению кварцевой нити, перемещающейся по шкале, которая смонтирована в одном корпусе с ионизационной камерой. Поэтому этот прибор называют прямопоказывающим. Диапазон измерений составляет 0,02-0,2 Р. Погрешность градуировки по гамма-излучению в нормальных условиях  $\pm 10\%$ .

Дозиметры ДП-22-В и ДП-24 рассчитаны на измерения больших доз. В комплект входит набор наперстковых камер. Они относятся к прямопоказывающим дозиметрам.

Имеются также приборы индивидуального дозиметрического контроля, чувствительным элементом которого являются люминесцентные кристаллы и фото пленки.

Принцип действия индивидуальных люминесцентных дозиметров (ИЛК) основан на использовании вспышечных кристаллофосфоров. Эти фосфоры обладают свойством накапливать энергию под действием излучения пропорционально дозе, достаточно длительное время сохранять ее, а затем быстро высвечивать при дополнительном освещении таблеток инфракрасным светом. По яркости вспышки фосфора судят о дозе облучения. Величина вспышки фосфоров регистрируется фотометром с измерительной схемой, чувствительным элементом которого служит фотоэлектронный умножитель.

Фосфоры могут возбуждаться не только радиоактивными излучениями, но и видимым светом, поэтому таблетки фосфора упаковывают в светонепроницаемые кассеты.

Индивидуальный фотопленочный контроль (ИФК) применяется довольно широко для определения безопасности при работе с гамма-излучением и основан на взаимодействии радиоактивного излучения с фотоэмульсией рентгеновской пленки. Под воздействием излучения фотопленка чернеет пропорционально дозе излучения. Почернение фотопленки измеряют с помощью фотометра или денситометра. ИФК осуществляется с помощью комплекта индивидуального дозиметрического фотоконтроля ИФКУ-1. Фотопленку помещают в светонепроницаемую кассету и носят ее, как правило, в нагрудном кармане. По истечении определенного времени пленку проявляют и денситометрируют, сравнивая оптическую плотность почернения с контрольными фотопленками, облученными известной дозой гамма-излучения. ИФК – это простота и документальность. Вместе с тем он обладает рядом недостатков: небольшой диапазон измерения доз – 0,05-15 Р, погрешность измерений составляет  $\pm 30\%$ , длительность обработки пленки не позволяет быстро определить полученную дозу сразу после работы.

### Вопросы и задания

1. Принцип действия счетчиков Гейгера-Мюллера
  2. Принцип действия ионизационной камеры
  3. Принцип действия сцинтилляционного метода регистрации ионизирующих излучений
  4. Фотографический метод регистрации ионизирующих излучений
  5. Химический метод регистрации ионизирующих излучений
  6. Принцип действия калориметрического метода регистрации ионизирующих излучений
  7. Радиометрические приборы регистрации ионизирующих излучений
  8. Дозиметрические приборы регистрации ионизирующих излучений
- Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

### Список литературы

1. Старков В.Д., Мигунов В.И. Радиационная экология. Тюмень: ФГУ ИПП «Тюмень», 2003.-304с.
2. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. Василенко О.В. Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
4. Пивоваров Ю.П., Михалев В.П. Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. Алексахин Р.М. Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.

### Использованные информационные ресурсы

<http://ru.wikipedia.org/wiki>  
<http://www.doza.ru>  
<http://www.ecoindustry.ru>  
<http://www.ozon.ru>  
<http://www.twirpx.com>  
<http://www.consultant.ru/?ref=revsel>

## Лекция 4.

### Механизмы воздействия ионизирующей радиации на организм

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются первичные (пусковые) механизмы воздействия радиации на живые организмы и механизмы восстановления радиационных повреждений клеток.

**Ключевые слова.** Этапы лучевого поражения, молекулярные компоненты клеток, действие радиации, механизмы репарации поврежденных клеток, радиочувствительность.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются вопросы к лекции и тесты

Открытие рентгеновских лучей и радиоактивности привлекло внимание не только физиков, но и биологов и врачей, стремящихся понять, как влияют невидимые лучи на живые объекты – клетки и ткани организма человека, животных и растений. Изучение биологического действия ионизирующих излучений началось сразу же после открытия рентгеновских лучей. Датой рождения радиобиологии, считают начало 1896 г., когда российский физиолог И. Р. Тарханов провел первые опыты на лягушках и насекомых по изучению реакции на действие облучения рентгеновскими лучами различных систем организма и на основании чего, небезосновательно, им было высказано предположение о возможности лечебного применения рентгеновского излучения.

Новые лучи были не только невидимы, но и неосязаемы, так как у живых организмов отсутствуют рецепторы, воспринимающие эти лучи. Однако миф об их безвредности быстро развеялся. Выяснилось, что длительное воздействие ионизирующего излучения чревато многими опасными последствиями. Оно вызывало ожоги кожи, лучевые язвы, выпадения волос. Несколько позже было обнаружено их вредное влияние на половые железы.

В 1903 г. российский ученый Е. С. Лондон доказал, что лучи, испускаемые радием, могут убивать мышей. В своих многочисленных экспериментах он продемонстрировал действие излучения радия на многие системы организма в частности на кроветворение.

На этом этапе развития радиобиологии было установлено два кардинальных факта, вызываемых ионизирующим излучением – *торможение клеточного деления* (М. Корнике) и *неодинаковая чувствительность* различных клеток, тканей и органов к облучению. Впервые неодинаковая радиочувствительность была отмечена французскими учеными И. Бергонье и Л. Трибонодо. На основании накопившихся экспериментальных

фактов в 1906 г. были сформулированы положения, вошедшие в историю как *закон, или правило Бергонье и Трибондо*. Суть закона состоит в том, что радиочувствительность клетки выше, если они обладают большей способностью к делению (размножению) и чем менее они дифференцированы, т. е. менее выражена их морфологическое развитие и функциональная способность. Несмотря на ряд исключений, как феномен это правило не утратило своего значения по настоящее время.

Следовательно, еще в самый ранний период первоначальных исследований была подмечена одна из важных особенностей ионизирующих излучений – *избирательность их действия*, определяемая не столько характеристиками самих излучений, сколько свойствами тех или иных клеток, т.е. их чувствительностью к излучению.

Очень рано - в 1903 г. была выявлена роль поражения ядра в клеточной радиочувствительности.

Уже в первые десятилетия XX в. началось изучение действия ионизирующей радиации на *эмбриогенез*, позволившее обнаружить возникновение различных аномалий при облучении на различных стадиях развития эмбриона.

Ранние наблюдения хотя и имели фундаментальное значение, но носили описательный характер. Какая-либо теория, объясняющая механизм действия ионизирующих излучений на живые объекты, отсутствовала.

Второй этап развития радиобиологии связан со становлением количественных принципов, имевших цель связать биологический эффект с дозой излучения. Этот этап характеризуется массовыми экспериментами на различных популяциях клеток и животных с количественным отражением результатов на специальных кривых *доза – эффект*.

Одной из уникальных особенностей действия ионизирующего излучения является т.н. *радиобиологический парадокс*. Суть его заключается в том, что очень малая по величине поглощенная энергия излучения эквивалентная энергии, необходимой для нагрева стакана воды на несколько градусов, способна вызвать в организме человека серьезные нарушения вплоть до смертельного исхода. Например, облучение в дозе 10 Гр убивает всех млекопитающих. Если условно перевести эту энергию излучения без потерь в тепловую, то окажется, что организм человека нагреется лишь  $0,001^{\circ}\text{C}$ , т.е. меньше, чем от стакана выпитого горячего чая.

Существование этого парадокса заставило предположить, что здесь важен способ подвода энергии излучения к наиболее уязвимым звеньям живой системы. Для такого вывода есть основания, так при общей небольшой величине энергии ионизирующего

излучения концентрируется в его отдельных частицах или квантах, действующих локально. По сути, вся история радиобиологии представляет собой цепь последовательных попыток научно объяснить существование радиобиологического парадокса.

Первая попытка была сделана в 1922 г. физиком Ф. Дессауром, предложившим теорию «точечного тепла», которая объясняла поражение клетки актом ионизацией (точечным нагревом) в некотором чувствительном объеме, составляющем небольшую часть клетки (молекулы или структуры клетки). Эта теория в последующем была развита в виде принципа *теории мишени* советским ученым Н. В. Тимофеевым-Ресовским, немецким ученым К. Циммером, английским ученым Д. Ли.

Значительное открытие было сделано в 1925-1927 гг. отечественными учеными Г. А. Надсоном и Г. С. Филипповым в экспериментах на дрожжах, а позже Г. Меллером на дрозофилах. Было установлено, что ионизирующее излучение не только повреждает наследственный механизм клетки, но и вызывает в нем необратимые изменения - мутации, проявляющиеся в стойких и передающихся по наследству вновь приобретенных признаках.

Особо интенсивное развитие радиобиологических исследований началось после атомной бомбардировки японских городов Хиросимы и Нагасаки в августе 1945 г., а также в результате радиоактивного загрязнения окружающей среды вследствие испытания ядерного оружия.

Перед радиобиологами встали новые сложные задачи: изучение закономерностей протекания острой лучевой болезни в следствии кратковременного воздействия больших доз ионизирующего излучения; выяснения механизмов лучевой гибели, различий в радиочувствительности органов и тканей; рассмотрение и определение причин ближайших и отдаленных последствий лучевого поражения; исследование генетических аспектов лучевого поражения применительно к соматическим (злокачественное перерождение) и половым (изменения в потомстве) клеткам; поиск эффективных средств защиты от острых лучевых поражений и их лечения. Были развернуты обширные научные исследования в разных странах, поддерживаемые и финансируемые правительствами. Именно в этот период (1940-е – 1950-е гг.) радиобиология формируется как самостоятельная область науки. Объектами изучения стали люди, пострадавшие от атомных бомбардировок. В экспериментах на животных стали детально изучаться эффекты разной мощности и различных видов ионизирующего излучения, основные синдромы лучевого поражения и формы лучевой гибели («костномозговая», «кишечная»,

«нервная») соответствующие поражению критических органов и систем – кроветворной, слизистой оболочки кишечника, мозга. Изучены отдаленные последствия облучения (лейкозы, рак, катаракты, нефросклероз, сокращение продолжительности жизни) и генетические последствия (точечные мутации и абберрации хромосом), приводящие к появлению в потомстве наследственных болезней и аномалий развития. В поисках действенных средств защиты от лучевого поражения, в экспериментах на животных, облученных в смертельных дозах, были испытаны десятки тысяч разнообразных препаратов. В 1950-1960 гг. были открыты радиозащитные средства, так называемы *радиопротекторы* – вещества, защищающие живой организм от действия радиации. В этот период разработаны и теоретические предпосылки для эффективных методов лечения. При лечении острой лучевой болезни с учетом картины поражения, успешно применяли в лабораторных условиях, а затем и на людях, пострадавших в результате различных ядерных авариях, такие препараты, как антибиотики, компоненты системы крови, гормоны, биостимуляторы, кровоостанавливающие средства, витамины и их комплексы.

В связи с интенсивными испытаниями ядерного оружия и повсеместным загрязнением Земли радионуклидами, в первую очередь долгоживущими  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , резким повышением радиационного фона, перед радиобиологией встали новые задачи изучения особенностей действия проникающих внутрь организма (инкорпорированных) излучателей, с их специфическим распределением в тканях, различной длительностью выведения из организма и хроническим облучением клеток. Многогранность задач, вставших перед радиобиологией, привела к развитию *радиационной генетики*, *радиационной экологии*, *радиационной гигиены* и других разделов радиобиологии, ознаменовала следующий третий этап ее развития.

Начало этого этапа можно связать с катастрофой, произошедшей на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 г. Стало ясно, что ядерные взрывы - не единственная серьезная опасность для человечества.

Растущее мирное использование ядерной энергии влечет за собой неизбежный и быстрый рост радиоактивного фона. Кроме того, пришло осознание того, что угроза здоровью и жизни людей может быть следствием не только кратковременного облучения в больших дозах, но и длительного облучения при относительно небольшой мощности доз. В последнем случае изменения в организме, вызванные ионизирующим излучением, отличаются от облучения в больших дозах не только количественно, но и качественно.



При этом изучение механизма поражений и доказательства их лучевой природы затруднены, а роль взаимодействия лучевых и не лучевых факторов возрастает.

Для решения проблем, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, стали необходимы новые широкие фундаментальные исследования по целому ряду проблем: малые дозы ионизирующего излучения (особенности их биологического действия), механизмы поражающего и стимулирующего действия на разные живые системы; особенности комбинированного лучевого поражения, включающего широкий спектр радионуклидов, попадающих внутрь организма; взаимодействие низкого уровня ионизирующего излучения с другими факторами (загрязнение атмосферы, воды, пищи продуктами техногенной деятельности человека, выбросами транспортных средств, тяжелыми металлами, сельскохозяйственными химикатами и т.д.); поиск новых принципиально новых противолучевых средств, пригодных для длительного введения в организм, нетоксичных и мобилизующих собственные защитные силы организма. Известные противолучевые средства, рассчитанные на применение в условиях ядерной войны или лучевой терапии (защита от облучения в больших дозах), оказались непригодными при длительном облучении в малых дозах, поскольку они, как правило, токсичны и дают кратковременный эффект. На данном этапе развития многие задачи радиобиологии еще не решены. Далеко несовершенно понимание первичных механизмов радиобиологических процессов, пока еще отсутствует единая теория радиобиологического эффекта.

Отдельное положение занимает радиоэкология, поскольку ее ведущей методологией является экология, хотя первопричина изменений, происходящих в популяциях и биоценозах – радиобиологические эффекты, относящиеся к области радиобиологии организмов.

В настоящее время достижения радиобиологии используются в самых разных областях деятельности человека. В сельском хозяйстве используют предпосевное облучение семян, как метод повышения всхожести и урожайности культур. Методы радиационной генетики применяют для получения и закрепления в потомстве полезных признаков, возникающих в результате мутационных изменений. Таким путем удастся не только создавать новые ценные сорта растений, но получать полезные изменения у животных, например повышение яйценоскости кур, шерстной продуктивности овец, интенсивности роста норок и улучшения качества пушнины. Эти же принципы используются для уничтожения вредителей путем направленной однополой стерилизации насекомых. На основе радиобиологических предпосылок организована лучевая

(холодная) стерилизация овощей, пищевых консервов, а также медицинских средств и реактивов.

В последнее десятилетие активное развитие получили исследования биологического действия неионизирующего электромагнитного излучения в связи с интенсивным развитием электронной и радиопромышленности. Это обстоятельство породило новую научную дисциплину – *радиобиологию неионизирующих излучений*.

Однако при всем разнообразии направлений фундаментальной задачей, составляющей предмет радиобиологии, является вскрытие общих закономерностей биологического ответа на ионизирующее излучение, на основе которых можно овладеть искусством управления лучевыми реакциями.

### **Биологическое действие ионизирующих излучений**

Ионизирующие излучения обладают очень высоким биологическим эффектом. Они способны вызывать ионизацию любых химических соединений биосубстратов, образовывать активные радикалы в клетках живых тканей. Вследствие этого результатом биологического действия радиации является, как правило, нарушение нормальных биохимических процессов с последующими функциональными и морфологическими изменениями в клетках и тканях животных или человека.

### **Первичные (пусковые) механизмы, лучевые реакции**

Выше были рассмотрены основные процессы взаимодействия ионизирующих излучений с веществом. Показано, что энергия излучения передается атомам и молекулам окружающей среды. Но это только первичный физический процесс, происходящий в клетке, тканях и во всем организме. Физический процесс индуцирует химические превращения в простых молекулах вещества и особенно макромолекулах биологических структур. Этот этап соответственно называется *химическим* этапом лучевого поражения клетки.

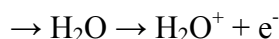
Радиационно-химические изменения молекул основываются на двух механизмах, обозначаемые как прямое и непрямое (косвенное) действие радиации.

Под прямым действием понимают такие изменения, которые возникают в результате поглощения энергии излучения самими молекулами (мишенями), что приводит к образованию разрывов связей в молекулах, как за счет непосредственного действия радиации, так и за счет внутри - и межмолекулярной передачи энергии.

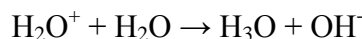
Под косвенным действием понимают изменения молекул, вызванными продуктами радиационного разложения (радиолиза) воды или растворенных веществ, что приводит к

деструкции биологических структур и образованию новых, несвойственных для организма соединений.

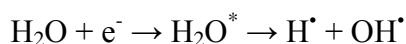
При косвенном воздействии ионизирующих излучений наиболее существенен процесс радиолиза воды, составляющей основную массу (до 90%) вещества в клетках. При радиолизе воды молекула ионизируется, теряя при этом электрон:



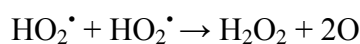
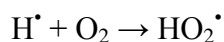
Ионизированная молекула воды реагирует с другой, нейтральной молекулой воды, в результате чего образуется высокореактивный радикал гидроксила  $\text{OH}^\cdot$ :



«Вырванный» электрон очень быстро взаимодействует с окружающими молекулами воды, возникает возбужденная молекула  $\text{H}_2\text{O}^*$ , которая в свою очередь диссоциирует с образованием двух радикалов  $\text{H}^\cdot$  и  $\text{OH}^\cdot$ :



При наличии растворимого кислорода в воде образуются и другие продукты радиолиза, обладающие окислительными свойствами: гидропероксидный радикал  $\text{HO}_2^\cdot$ , пероксид водорода  $\text{H}_2\text{O}_2$  и атомарный кислород:



Считается, что основной эффект лучевого воздействия обусловлен такими радикалами как  $\text{H}^\cdot$ ,  $\text{OH}^\cdot$ . И особенно  $\text{HO}_2^\cdot$  (гидропероксид). Время их жизни в воде составляет не более  $10^{-5}$  с. За этот период они либо рекомбинируют друг с другом, либо реагируют с растворимым субстратом.

Кроме этих окислительных продуктов в процессе радиолиза воды возникает стабилизированная форма электрона – *гидратированные электроны*. Они также обладают высокой реакционной способностью, но уже в качестве восстановителя, реагируя с продуктами радиолиза и другими легко восстанавливаемыми веществами, в частности с дисульфидными группами. Другим восстановителем, образующимся в процессе радиолиза воды, является атомарный кислород.

Возникшие в результате действия излучения с водой радикалы взаимодействуют с растворенными молекулами различных соединений, давая начало вторично-радикальным продуктам. Время их жизни значительно больше по сравнению со сроками жизни первичных радикалов.

В клетке организма данные процессы протекают значительно сложнее, чем при облучении просто воды, так как поглощающим веществом здесь служат органические

молекулы, повреждаемые либо прямым действием, либо продуктами радиолиза воды (косвенным), что приводит к разрыву химических связей в жизненно важных макромолекулах. Этот процесс чаще всего происходит в промежутке между образованием ионных пар и формированием конечных химических продуктов. Кроме того биологический эффект усиливается за счет кислорода, который присутствует в среде и обладает сенсibiliзирующим действием.

Явления, происходящие на начальных, физико-химических этапах лучевого воздействия, принято называть первичными или пусковыми. Так как они определяют весь дальнейший ход развития лучевых поражений. Последующие этапы лучевого поражения проявляются в нарушении обмена веществ в биологических системах с изменением соответствующих функций организма (рис. 13). У высших организмов процессы протекают на фоне нейрогуморальных реакций



Рис. 13. Этапы лучевого поражения.

Необходимо учитывать, что изменения облучаемого субстрата в клетке не всегда являются окончательными на каждом из этапов, приведенных на схеме. Как правило, эти изменения носят промежуточный характер, и окончательный исход не может быть спрогнозирован, так как вместе с повреждением может произойти восстановление (репарация) исходного состояния.

Из выше изложенного следует, что взаимодействие свободных радикалов с органическими и неорганическими веществами идет по типу окислительно-восстановительных реакций и составляет эффект косвенного действия. Величина прямого

и косвенного эффекта в первичных радиобиологических процессах неодинакова. В абсолютно сухих веществах преобладает прямое, а в растворенных - косвенное. У животных, в т. ч. человека, примерно 45 % поглощенной энергии приходится на прямое действие и 55% на косвенное.

О наличии прямого и косвенного действия радиации на биологические объекты можно судить по двум феноменам – эффекту разведения и кислородному эффекту.

*Эффект разведения* – это состояние при котором абсолютное число поврежденных молекул вещества в слабом растворе не зависит от его концентрации и остается для данной экспозиционной дозы постоянным, так как в каждом конкретном случае в растворе образуется постоянное количество активных радикалов. Эффект разведения четко проявляется при облучении *in vitro* с растворами и суспензиями макромолекул, вирусов, бактерий и т. д. Однако эффект разведения слабо проявляется при облучении *in vivo* в многоклеточных организмах и суспензиях клеток тканей организма. Снижение эффективности *in vivo* объясняется тем, что большая часть продуктов радиолиза воды поглощается клеточными метаболитами и не доходит до биологически активных макромолекул, которые обладают защитными свойствами.

*Кислородный эффект.* В развитии первичных реакций при облучении биообъектов большое значение имеет концентрация кислорода в среде. С повышением его концентрации в окружающей среде и объекте облучения эффект лучевого поражения усиливается, и наоборот, при пониженной концентрации кислорода наблюдается уменьшение степени лучевого поражения. Это явление было названо кислородным эффектом.

Выраженность кислородного эффекта у разных видов излучения неодинаковая и зависит от их линейной передачи энергии. С повышением ЛПЭ кислородный эффект снижается. При действии редкоионизирующих излучений (гамма- и рентгеновские лучи) он наиболее выражен, а при воздействии  $\alpha$ -частицы он отсутствует.

Кислородный эффект это универсальное явление, он проявляется во всех радиобиологических реакциях – ослаблением или усилением биохимических изменений, мутаций у всех биологических объектов (растений и животных) и на всех уровнях их организации – молекулярном, субклеточном, клеточном, тканевом, органном. Однако до сих пор, нет полной ясности в том, какие свойства присущи кислороду, ответственного за радиомодифицирующее действие. Наиболее общепризнанна точка зрения является та, что кислород активно взаимодействует с радикалами биологических молекул, образующихся

при действии радиации, фиксируя возникшие в них потенциальные повреждения, и тем самым препятствует процессам репарации.

Количественным выражением изменения эффекта облучения под влиянием кислорода служит ФИД (фактор изменения дозы), который в данном случае называют коэффициентом кислородного усиления – ККУ (OER – oxygen enhancement ratio).

Кислородный эффект нередко применяется при лечении больных со злокачественными новообразованиями. Для усиления лучевого поражения клеток опухоли создают условия повышенного содержания кислорода в ней и одновременно для уменьшения радиационного повреждения здоровых клеток обеспечивают гипоксическое состояние окружающих тканей.

У млекопитающих, максимальная радиочувствительность тканей отмечается при нормальном парциальном давлении кислорода (30-45 гПа). Снижая насыщенность тканей кислородом, можно повысить радиорезистентность организма. Повышение содержания кислорода в окружающей среде и в объекте облучения после лучевого воздействия положительно влияет на процессы репарации радиационных повреждений и восстановления жизнеспособности клеток.

Следовательно, кислород играет двоякую роль при лучевом воздействии - с одной стороны, усиливает первичное поражение, а с другой – облегчает пострadiационное восстановление.

### **Действие радиации на молекулярные компоненты клетки**

При объяснении действия ионизирующей радиации на молекулярные компоненты клетки удобно пользоваться упрощенным представлением о ее строении и химическом составе. Основную массу клетки составляет вода, в которой в растворенном или взвешенном состоянии находятся органические молекулы, макромолекулы и надмолекулярные структуры различной степени сложности.

Макромолекулы относят к трем типам молекул: полисахариды, полинуклеотиды (нуклеиновые кислоты) и полиаминокислоты (белки).

К надмолекулярным структурам, из которых состоят клеточные органеллы, относятся:

- белково-липидные вещества, из которых построены мембранная оболочка клетки и ядра, цитоплазматическая сеть, лизосомы, митохондрии;
- нуклеопротеиды, состоящие из нуклеиновых кислот и белков, из которых состоят хромосомы и рибосомы.

В состав клетки входят тысячи различных веществ, которые можно свести к комбинациям нескольких достаточно простых видов низкомолекулярных соединений. Это углеводы, аминокислоты, карбоновые кислоты, азотистые основания, сложные гетероциклические соединения, а также неорганический ион – остаток фосфорной кислоты. Комбинации этих соединений образуют высшие ступени организации клетки – макромолекулы и надмолекулярные структуры.

*Углеводы.* Молекулы углеводов, входящие в состав клетки разнообразны в бактериальной клетке их насчитывается около 200. Однако, набор углеводов, входящих в структурные компоненты клетки, ограничен - это производные циклических форм глюкозы, рибозы и дезоксирибозы. Из производных глюкозы составлены однородные биополимеры – полисахариды, выполняющие в живых тканях в основном структурно-механическую функцию. Рибоза и дезоксирибоза входят в состав нуклеотидов – мономерных единиц соответственно РНК и ДНК. Основные пути радиолиза этого вещества и близких ей соединений обусловлены разрывом связи --С-Н и -О-Н с последующим окислением и образованием карбонильных соединений. В некоторых случаях происходит разрыв связи -С-С. С точки зрения радиобиологической значимости наибольший интерес представляет радиохимические превращения дезоксирибозы, входящей в состав ДНК. где поражающее действие радиации осуществляется при начальном воздействии радикалами –ОН. При действии радиации на однородные полимеры углеводов – полисахариды – важную роль играют превращения, начинающиеся с разрывом полимерной цепочки. В результате могут образовываться молекулы с меньшей молекулярной массой или происходят сшивки фрагментов с возникновением высокомолекулярных соединений.

*Карбоновые (жирные) кислоты.* Карбоновые кислоты – это углеводороды с присоединенной карбоксильной группой –COOH. Они подразделяются на насыщенные и ненасыщенные. Ненасыщенные содержат в углеводной цепочке двойные связи C=C. Карбоновые кислоты входят в структурные элементы белковолипидных мембран.

В условиях прямого действия чувствительной оказывается связь углеводорода с карбонильной группой. Разрыв этой связи приводит к образованию двуокиси углерода и насыщенного углеводорода, содержащего на один углеродный атом меньше, чем исходная молекула:



Кроме того, радикалы, возникающие после отщепления карбоксильной группы, могут реагировать между собой с образованием димера:



Эти два вида превращения играют преобладающую роль при радиолизе насыщенных жирных кислот с малым числом углеродных атомов в цепочке.

Если облучение происходит в присутствии кислорода, то происходит отщепление водорода после разрыва связи -С-Н, что сопровождается образованием гидроперекисей и последующим превращением в карбонильные соединения.

В условиях непрямого действия играют роль радикалы Н и ОН, которые естественно обеспечивают разрывы связи -С-Н с последующей димеризацией или гидроксированием:



В присутствии кислорода образуются все гидроперекиси и карбонильные соединения.

При облучении ненасыщенных жирных кислот в условиях прямого действия радиации и в отсутствии кислорода основной реакцией является декарбоксилирование и характер радиолиза существенно не отличается от того, что наблюдается для ненасыщенных жирных кислот. В присутствии кислорода происходят цепные реакции окисления, механизм которого сходен с тем, который имеет место при аутоокислении ненасыщенных жирных кислот на воздухе. Реакция начинается с разрыва связи -С-Н и отрыва атома водорода при углеродном атоме, расположенном в промежутке между двойными связями. В результате образуется радикал  $\text{R}_1\text{-CH=CH-CH-CH=CH-R}_2$ . Далее в нем происходит смещение двойной связи в сопряженное положение с образованием радикальных продуктов двух видов:



Эти радикалы взаимодействуют с молекулой кислорода и образуют высокоактивные перекисные радикалы, которые могут реагировать с ненасыщенной жирной кислотой с образованием гидроперекиси и нового радикала, что ведет к удлинению цепи молекулы.

То же самое происходит и при непрямом действии радиации ненасыщенных жирных кислот, в которых первичная реакция отщепления водорода происходит в результате действия радикалов -ОН.

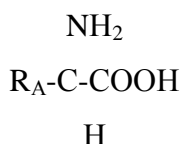
Гидроперекиси в дальнейшем преобразуются в карбонильные соединения. При радиолизе жирных кислот чаще всего обнаруживают эти два вида продуктов.

*Фосфолипиды.* Это структурные элементы белково-липидных мембран. В молекулу фосфолипидов входят остатки насыщенной и ненасыщенной жирных кислот и остаток фосфорной кислоты. Основные радиационно-химические превращения фосфолипидов

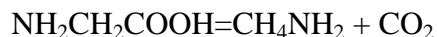


начинаются с разрушения двойной связи в ненасыщенной жирной кислоте. В присутствии кислорода за ним следует образование гидроперекиси и распад последней с образованием различных карбонильных соединений, накопление которых в избыточных количествах оказывает токсическое действие на клетку. По мнению многих радиобиологов, повреждение фосфолипидов даже в небольших количествах приводит к изменению проницаемости биологических мембран, нарушению ионного гомеостаза, энергетических и обменных процессов в клетке. Такие нарушения могут привести клетку к летальному исходу при облучении ее в относительно невысоких дозах.

*Аминокислоты.* Аминокислоты имеют общую структуру и отличаются друг от друга по виду присоединенного радикала:

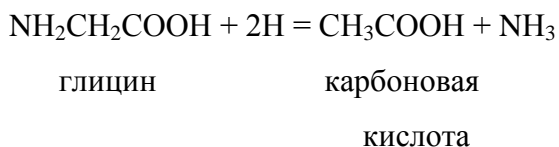


Всего в полипептидные цепочки входят 20 аминокислот. В состав молекул аминокислот входит аминогруппа. При облучении глицина и аланина (первая группа аминокислот) в условиях прямого действия радиации (как и в карбоновых кислотах) происходит отщепление  $\text{CO}_2$ :



При непрямом действии радиации (в водных растворах) образуется много различных продуктов: аммиак, карбоновая кислота, кетокислота, водород, альдегид, углекислый газ, водород. При этом с наибольшим выходом происходит образование аммиака. Таким образом, в этих условиях имеет место разрыв связи углерода с атомом аминогруппы.

Суммарные реакции, приводящие к образованию перечисленных продуктов радиолиза (табл. 6), можно представить как результат разрыва связи  $\text{-C-N-}$  при реакции с радикалом Н и присоединения на место аминогруппы атомарного водорода:



и как разрыва  $\text{-C-N-}$  в реакции с радикалом ОН и образованием на месте этой связи карбонильной группы.

Выходы основных продуктов радиолиза глицина и аланина  
(по Н. А. Дружниковой, 1973)

Вещество	Выход		Действующие факторы	Поврежденные связи
	в глицине	в аланине		
Аммиак	3,97	4,48	Н, ОН	–C–N–
Карбоновая кислота	1,2	1,04	Н	–C–N–
Кетокислота	2,1	1,92	ОН	–C–N–
Водород	2,02	1,1	ОН	–C–N–, –C–H–
Альдегид	0,53	0,59	ОН, прямое действие	–C–N–, C–H–, –C–C–
Углекислый газ	0,9	0,59	ОН, прямое действие	–C–N–, –C–C–, –C–H–
Амин	0,19	0,17	Прямое действие	–C–C–

При исследовании радиолиза водных растворов остальных аминокислот из первой группы (валина, лейцина и изолейцина) установлено увеличение выхода реакции, связанных с разрывом связей –C–H– и –C–C– в углеводородной части молекулы и соответственно уменьшается выход дезаминирования.

Основной реакцией радиолиза аминокислот второй группы, не содержащих серу и отличающихся от аминокислот первой группы содержанием еще одного гидроксильного или –NH<sub>2</sub> в водных растворах будет дезаминирование.

Радиационно-химическое превращение аминокислот второй группы, содержащих серу при облучении в водных растворах в присутствии кислорода, начинается с разрыва связи –S–H и приводит к образованию димера – цистина.

Для радиолиза аминокислот 3 группы характерны общие для всех аминокислот реакции дезаминирования и декарбоксилирования. Каких либо специфических реакций не обнаружено, поскольку все аминокислоты этой группы (кроме аргинина) содержат в своем составе лишь карбоксильную и аминогруппу.

При радиолизе циклических аминокислот (4 группа) основную роль играют превращения, связанные с кольцевой структурой. В молекуле фенилаланина и тирозина циклическая структура представлена бензольным кольцом. При прямом действии радиации на бензол основные реакции начинаются с разрыва связи –C–H. Продукты радиационно-химических превращений циклической части этих аминокислот в водных растворах образуются после замены атома Н на гидроксил или, наоборот, в месте их присоединения к углероду бензольного кольца.

Реакция дезаминирования и декарбоксилирования в аланинной части молекулы играют у тирозина и фенилаланина второстепенную роль, также как и декарбоксилирование у пролина.

У гистидина и триптофана основной вид радиационно-химических превращений в водном растворе связан с разрушением пятичленных циклов.

Результаты исследований по радиолизу аминокислот служат основой для понимания радиационно-химических превращений белков. В белках аминокислоты связаны между собой пептидной связью через карбоксильную и аминогруппы. Поэтому помимо реакций, связанных с повреждением аминокислот, в радиолизе белков существенную роль играет разрушение пептидных связей  $-N-C-$ , определяющих первичную структуру белков, и водородных связей, определяющих вторичную и третичную структуры. Разрушение пептидных связей может привести к образованию низкомолекулярных фрагментов, сшивок и полимеризации. Разрушение водородных связей приводит к денатурации и белок выпадает в осадок.

*Азотистые основания.* Это производные двух циклических соединений – пиримидина и пурина, содержащих в кольце азот. В состав нуклеиновых кислот входят пять азотистых оснований: 3 пиримидина и 2 пурина. К пиримидинам относятся - тимин, входящий в состав ДНК, урацил, входящий в состав РНК, цитозин. К пуринам относятся гуанин и аденин.

При радиолизе азотистых оснований нестабильные продукты радиолиза воды в первую очередь атакуют двойную связь  $-C=C-$  между углеродными связями и двойную связь  $-N=C-$  в пятичленном цикле пуринов. Конечные продукты, возникающие после таких воздействий, будут преимущественно гликолями, гидропроизводными и гидроперекисями, образующимися в результате присоединения по месту двойной связи радикалов  $OH$ ,  $H$  и  $HO_2$  соответственно. Другие радиационно-химические превращения азотистых оснований затрагивают преимущественно аминогруппу. Дезаминирование играет существенную роль в радиолизе азотистых оснований, содержащих аминогруппу. Для радиобиологии особенно интересна реакция дезаминирования при которой аминогруппа заменяется на гидроксильную группу. Выход этих реакций составляет небольшую часть от общего выхода дезаминирования цитозина и аденина. Эти реакции примечательны тем, что они практически не репарабельны в клетках и вместе с тем могут привести к генным мутациям, так как меняют смысл кодирующего триплета ДНК.

Радиолиз азотистых оснований, рибозы, дезоксирибозы составляют основу для понимания природы превращений, вызываемых в нуклеиновых кислотах. Кроме реакций,

характерных для низкомолекулярных компонентов, в нуклеиновых кислотах происходят разрушения фосфорноэфирных связей, приводящие к одиночным и двойным разрывам нитей, и водородных связей, ведущие к денатурации.

### **Действие радиации на клетку, радиация и ДНК**

Основной феномен радиобиологии - радиочувствительность необходимо рассматривать на уровне клетки, в которой возникают начальные процессы лучевого поражения.

В результате облучения повреждаются все внутриклеточные структуры. В клетке можно зарегистрировать множество самых разнообразных реакций - задержку клеточного деления, угнетения синтеза ДНК, повреждение мембран и др. Степень выраженности этих реакций зависит от того, на какой стадии жизненного цикла произошло облучение. В связи с этим необходимо иметь представление о структуре и функции нуклеиновых кислот в клеточном цикле.

Установлено, что синтез ДНК в клетке происходит в интерфазе, занимая в ней определенный промежуток времени. Это позволило разделить интерфазу на три периода - периода синтеза ДНК (S-период), предсинтетический и постсинтетический ( $G_1$  и  $G_2$  соответственно). Митоз - четвертый период обозначается буквой М. Продолжительность жизни клеточного цикла - время между двумя последовательными делениями клетки - состоит из отдельных стадий, длительность которых в разных тканях варьирует по величине, располагаясь следующим образом:  $M < G_2 < S < G_1$  (рис. 14). В активно обновляющихся тканях (костный мозг, кожа, эпителий ворсинок кишечника), а также в опухолях, продолжительность всего цикла составляет от 10 до 48 часов. Наиболее продолжительные периоды  $G_1$  и S, а самый короткий митоз 30 - 60 мин. В малообновляющихся тканях большинство клеток находится в  $G_1$  периоде, длительность которого измеряется неделями, месяцами и даже годами (клетки ЦНС), что обусловило выделение еще одной стадии -  $G_0$ . Клетки, находящиеся в этой стадии, принято считать вне цикла или покоящимися. Такие клетки составляют резерв популяции в случае гибели части клеточного пула.

Возвращаясь к лучевым реакциям клетки нужно отметить, что многие из них легко переносятся клеткой, так как являются следствием повреждения какой-либо части множественных структур, утрата которой быстро восстанавливается или просто остается незамеченной. Такие клеточные реакции называются *физиологическими или кумулятивными эффектами облучения*. К ним относятся различные нарушения обмена веществ или окислительного фосфорилирования, слипания хромосом и др.

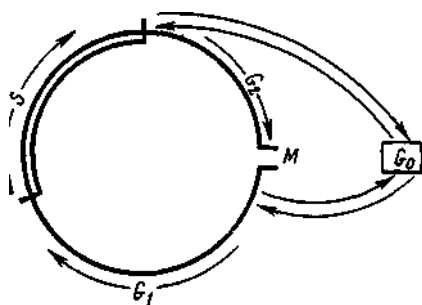


Рис. 14. Митотический цикл:

М - митоз, G<sub>1</sub> - предсинтетический период, S - период синтеза ДНК. G<sub>2</sub> - постсинтетический период, G<sub>0</sub> - фаза покоя (клетка может переходить в нее либо после завершения синтеза ДНК, либо по окончании митоза; в фазе покоя клетка находится до тех пор, пока некоторый стимул не побудит ее снова вступить в цикл соответственно в G<sub>2</sub>- или G<sub>1</sub>- периоды)

Как правило, подобные реакции проявляются в ближайшие сроки после облучения и со временем проходят. Наиболее универсальна из них – временная задержка клеточного деления, называемая *радиационным блокированием митозов*. Снижение числа делящихся клеток после облучения было замечено уже вскоре после открытия рентгеновских лучей. Данный эффект к настоящему времени хорошо изучен в количественном отношении *in vitro* и *in vivo* для клеток и тканей человека и животных.

Длительность задержки деления зависит от дозы ионизирующего излучения и проявляется у всех облученных клеток, независимо от того выживут они или нет. Для большинства клеток задержка клеточного деления соответствует примерно одному часу на каждые 1 Гр. Причем с увеличением дозы увеличивается продолжительность задержки деления облученной клетки, а не доля реагирующих клеток.

Время задержки деления зависит и от стадии клеточного цикла, которой находится клетка. Наиболее длительна она в тех случаях, когда воздействию подвергаются клетки в стадии синтеза ДНК (S) или постсинтетической стадии (G<sub>2</sub>) и самое короткое время задержки – при облучении в митозе, когда клетка, вступая в митоз, заканчивает его без задержки.

Из-за различий в длительности задержки деления, наблюдающиеся на отдельных стадиях клеточного цикла, восстановление митотической активности происходит волнообразно.

Логично рассматривать задержку деления как проявление защитно-приспособительных процессов. Мнение о защитном характере задержки митозов основано на том, что продолжительность задержки отражает степень восстановления

клетки. Однако наблюдения показали, что степень задержки митозов одинакова как для гибнущих, так и для выживших клеток.

В настоящее время недостаточно данных для того, чтобы однозначно оценить задержку деления как проявление радиационного повреждения множественных структур или оценить как защитную реакцию клеток на их повреждение. Механизм радиационной задержки деления клеток до конца не выяснен. Ее связывают с подавлением синтеза ДНК, однако есть данные о том, что снижение синтеза ДНК является следствием, но не причиной задержки митозов. Причина задержки митозов, вероятно, обусловлена повреждением внутриклеточных структур, ответственных за регуляцию деления. Значительное количество экспериментальных данных свидетельствует о роли радиационного повреждения ядра в механизме угнетения клеточного деления, в то же время установлено, что оно не связано с повреждением хромосом.

Реакцию задержки деления следует отличать от *полного подавления митоза*, наступающего после воздействия больших доз, когда клетка некоторое время жизнеспособна, но теряет возможность делиться.

Еще в начале века были описаны различные реакции клеток на облучение - от временной задержки роста и размножение до полной деградации и лизиса. Выраженность эффекта зависела от дозы облучения и особенностей объекта. В 1906 г. Бергонье и Трибондо, обобщив накопленный к тому времени экспериментальный материал, сформулировали правило о том, что облучение тем сильнее действует на клетки, чем интенсивнее они делятся и чем менее они дифференцированы, т.е. радиочувствительность ткани пропорциональна пролиферативной активности и обратно пропорциональна степени дифференцированности составляющих ее клеток. Это правило указывает, что ответная реакция клеток на лучевое воздействие зависит от физиологического состояния объекта.

В зависимости от пролиферативного статуса клеток, а точнее от стадии клеточного цикла, в которой происходит реализация процесса клеточной гибели, различают соответственно *репродуктивную* и *интерфазную гибель*.

*Репродуктивная форма лучевой гибели клеток.* Эта форма гибели клеток наиболее распространена в природе, она характерна для быстроделящихся клеток. Первая реакция на облучение, как описано выше, - задержка их вступления в митоз, т.е. клетка, облученная в интерфазе, не делится в ожидаемый момент. Через определенный промежуток времени, который зависит от величины дозы, клетки вступают в митоз. Их дальнейшая судьба складывается по-разному. Часть клеточной популяции, вступив в

митоз, не в состоянии разделится. Образуются гигантские клетки. Их размеры могут в сотни раз превосходить размеры необлученных клеток. Такие клетки могут возникнуть в результате слияния двух соседних, чаще «сестринских» клеток. Они способны к 2-3 делениям, после чего погибают. Также гигантские клетки могут возникать без слияния в результате общего увеличения синтезированных клеточных компонентов (содержание ДНК, РНК и белка увеличивается пропорционально размерам клетки). В конечном итоге, гигантские клетки погибают, вероятно, из-за нарушения механической прочности мембран и изменения оптимального для питания соотношения поверхности клетки и ее объема (рис. 15).

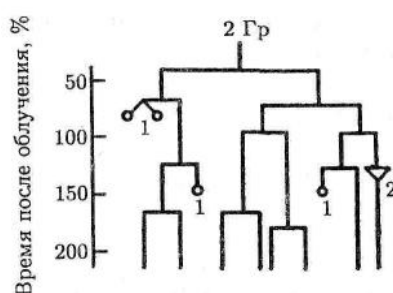


Рис.15. 1. – гибель клетки, 2 - слияние двух клеток с образованием гигантской клетки

Особенность другой разновидности репродуктивной формы гибели состоит в том, что гибель большей части делящихся клеток происходит не сразу. Они проходят митоз и делятся. Однако сразу же после первого деления появляются погибшие клетки. Еще больше клеток гибнет после второго, третьего и т.д. митозов.

Репродуктивная форма гибели неразрывно связана с процессом митоза. Ее существенная особенность состоит в том, что облученные клетки в течение определенного промежутка времени сохраняют метаболическую активность, но не в состоянии разделится с образованием жизнеспособных дочерних клеток, способных делится дальше. До первого постлучевого митоза погибшие клетки не появляются - процессы митоза как бы выявляют летальные повреждения, вызванные облучением. Основной причиной репродуктивной гибели клеток являются структурные повреждения ДНК в виде *хромосомных перестроек* или *абберации хромосом*. Возникающие хромосомные перестройки весьма разнообразны. Можно отметить лишь несколько из основных аббераций: фрагментация, формирование хромосомных мостов, дицентриков, кольцевых хромосом, появление внутри – и межхромосомных обменов и т. п. Мосты механически, препятствуют делению клетки. Появление обменов и ацентрических

фрагментов приводит к неравномерному разделению хромосом и утрате генетического материала, вызывающей гибель клетки из-за нехватки метаболитов, синтез которых кодировался ДНК утраченной хромосомы.

Долю клеток с хромосомными aberrациями часто используют в качестве количественного показателя радиочувствительности, так как число aberrаций зависит от дозы облучения, и хорошо коррелирует с выживаемостью клеток. Подсчет клеток с хромосомными aberrациями используется при количественной оценке лучевого поражения.

Гибель млекопитающих в результате воздействия ионизирующего излучения обусловлена опустошением популяции быстроделящихся клеток тканей, необходимых для жизнедеятельности организмов. Такими критическими системами являются системы кроветворения и пищеварения. В кроветворных органах (костный мозг, селезенка) и тонком отделе кишечника имеются активно делящиеся клетки (стволовые), являющиеся родоначальниками всех функционирующих клеток соответственно крови и клеток тонкого кишечника, ответственных за всасывание питательных веществ. В результате репродуктивной гибели стволовых клеток, их численность падает ниже совместимого с жизнью критического уровня, что приводит к гибели организма.

Особенности гибели быстроделящихся клеток характеризуют термины, которые в разное время были приняты для ее обозначения: «митотическая гибель», «отсроченная гибель», «гибель при делении», «репродуктивная гибель».

Последний термин получил наибольшее распространение, поскольку подчеркивает связь этого типа клеточной гибели с процессом репродукции, воспроизводства клеток.

*Интерфазная форма гибели.* Данная форма клеточной гибели наступает до вступления клетки в митоз и характерна для неделящихся, медленно делящихся и ограниченно делящихся клеток. К неделящимся клеткам относят нервные или мышечные клетки, к медленно делящимся можно отнести - клетки печени, почек, сердца и ограниченно делящимся - лимфоциты. Для обозначения рассматриваемого типа гибели приняты термины: «немитотическая гибель», «немедленная гибель» «гибель в отсутствии деления», «интерфазная гибель». Каждый из терминов подчеркивает особенности рассматриваемого типа гибели, но наиболее распространено последний - «интерфазная гибель». Для большинства клеток интерфазная гибель наступает при дозах от несколько десятков до сотен грей, поэтому при опасных для жизни человека дозах 4 – 10 Гр эти клетки не гибнут. Исключение составляют лимфоциты и половые клетки на некоторых



стадиях их развития, интерфазная гибель которых наступает, уже при дозах в десятые и сотые доли грей.

Молекулярный механизм интерфазной гибели клеток изучен слабее, чем репродуктивный. Неясна и причина различия в радиочувствительности лимфоцитов и других видов клеток. Изменения, ведущие к интерфазной гибели, наблюдаются в клетках всех видов и, с увеличением дозы меняется не доля погибших клеток, а среднее время гибели всей популяции. Полагают, что причина различий заключается в том, что интерфазная гибель обусловлена повреждением не уникальной структуры клетки - ДНК, а мембран и других ее структур. Существуют данные о том, что чувствительность к облучению таких клеток повышается вследствие накопления цитоплазме гидролитических ферментов или их активации, приводящей к деструкции ДНК. Среди морфологических изменений наиболее отчетливо выражено набухание и пикноз ядер, вакуолизация и распад ядрышек.

*Причины радиационной гибели клеток.* При анализе причин радиационного поражения клеток следует рассматривать, прежде всего, проблему радиочувствительности двух ее компонентов ядра и цитоплазмы. В настоящее время можно утверждать, что большей радиочувствительностью обладает ядро клетки и именно ему принадлежит решающая роль в исходе облученной клетки, нежели цитоплазме. Рассмотренная выше корреляция между долей клеток с хромосомными aberrациями и летальным эффектом свидетельствует об определяющей роли ядерного материала в исходе лучевого поражения клетки. Кроме этого имеется ряд экспериментов, подтверждающих более высокую радиочувствительность ядра, по сравнению с цитоплазмой. Например, попадание одной  $\alpha$ -частицы в ядро оплодотворенного яйца насекомого (наездника) вызывает гибель зародыша, которая в случае облучения цитоплазмы яйца регистрируется лишь после облучения 15 млн.  $\alpha$ -частиц. Облучение хромосом 15-20 протонами вызывало в них структурные повреждения, в то время как бомбардировка различных участков цитоплазмы сотнями тысяч частиц не оказывало влияния на клетку. В опытах И. Орда и К. Даниелли на амебах было показано, что пересадка ядер от особей, облученных в дозе 150 Гр, при которой выживало 5% амеб необлученным, оказывала аналогичный эффект (выживало 4% реципиентов). При облучении цитоплазмы дозой 250 Гр и пересадки в нее необлученного ядра наблюдалось 100% выживаемость амеб, которые давали жизнеспособное потомство.

Приведенные примеры демонстрируют большую радиочувствительность ядра по сравнению с цитоплазмой. Однако нельзя опровергать роль и цитоплазмы в

радиационном поражении ядерного аппарата. Имеется много экспериментальных данных о зависимости возникновения нарушений в ядре клетки от степени облучения цитоплазмы, что является следствием сложных ядерно-цитоплазматических отношений. Важно, что для разных биологических объектов удельный вес поражений ядра и опосредованных влияний может сильно различаться, отражая особенности жизнедеятельности клеток и функционирования их органелл. Указанные примеры имеют отношение к репродуктивной форме гибели клеток. Что касается интерфазного поражения, здесь эти соотношения еще более сложны и малоизучены.

Какие же внутриядерные структуры ответственны за жизнедеятельность клетки. В клетках содержится несколько десятков молекул ДНК. ДНК связана с белками, которые участвуют в поддержании структуры интерфазного хроматина, формирования хромосом и переносе генетической информации. Облучение вызывает различные повреждения ДНК и ее комплексов. К их числу относят разрыв молекул ДНК, потери азотистых оснований и изменения их состава, нарушения нуклеотидных последовательностей, сшивки ДНК-ДНК, и ДНК-белок, нарушения комплексов ДНК с другими молекулами.

Различают *одиночные разрывы*, когда связь между отдельными атомными группировками нарушается в одной из нитей двухнитчатой молекулы ДНК, и *двойные*, когда разрыв происходит сразу в близких участках двух цепей, что приводит к распаду молекулы. При любом разрыве нарушается считывание информации с молекул ДНК и пространственной структуры хроматина.

Одиночные разрывы не приводят к поломкам молекулы ДНК, так как разорванная нить прочно удерживается на месте водородными, гидрофобным и другими связями с противоположной нитью ДНК, и, кроме того, структура хорошо восстанавливается мощной системой репарации. Поэтому считается, что одиночные разрывы не являются сами по себе причиной гибели клеток. При увеличении дозы излучения возрастает вероятность трансформации одиночных разрывов в двойные. Поскольку увеличивается вероятность того, что независимые одиночные разрывы в противоположных цепях возникают друг против друга. При дозах до 20 Гр двойные разрывы являются следствием одновременного повреждения обеих нитей ДНК.

При действии излучений с небольшой плотностью ионизации ( $\gamma$ -, рентгеновское излучение, быстрые электроны) 20 – 100 одиночных разрывов вызывают один двойной. Плотнойонизирующие излучения индуцируют гораздо большее число двойных разрывов.

Рассчитано, что при дозе 1 Гр в каждой клетке человека повреждается 5000 оснований молекул ДНК и возникает 1000 одиночных и 10-100 двойных разрывов, каждый из которых может стать причиной возникновения абберации.

Кроме образования разрывов ДНК вследствие облучения нарушается структура оснований, прежде всего тимина, что приводит к увеличению числа генных мутаций. Происходит также образование сшивок между ДНК и белком нуклеопротеинового комплекса.

В последние годы особое внимание уделяется ДНК-мембранному комплексу - сложному структурному образованию в области соединения нитей ДНК с ядерной мембраной в состав, которого входят белок и липиды (рис. 16). Распад ДНК-мембранного комплекса фиксируется при облучении клеток при дозе 2 Гр.

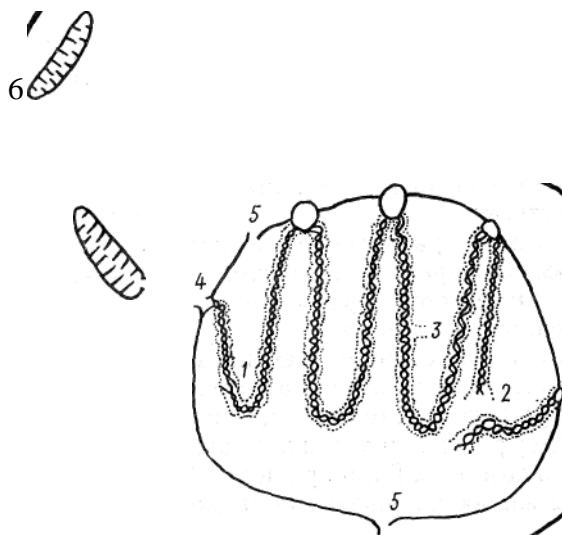


Рис. 16. Основные виды структурных радиационных повреждений

1. - одонитчатые (одиночные) разрывы в молекуле ДНК, 2 – двунитчатые (двойные) разрывы ДНК, 3 – нарушение связи ДНК с белком, 4 – повреждение структуры ДНК-мембранного комплекса, 6 – повреждение митохондриальной мембраны.

Помимо структурных нарушений ДНК (таб.7) в облученной клетке наблюдаются нарушение выдачи информации в цитоплазму от ДНК, а также функционирование внутриклеточных мембран. Нарушение целостности мембран может привести к сдвигу ионного баланса клетки, что также неблагоприятно отражается на ходе метаболических процессов (в норме клетка вкачивает в себя калий и высвобождает в межклеточное пространство натрий). Вследствие поражения митохондрий снижается энергетический обмен клетки.

Таблица 7

Повреждение ДНК в клетках млекопитающих, индуцированные действием излучений с низкими ЛПЭ при внутреннем облучении

Тип повреждений	Количество повреждений в клетке на 1 Гр
одиночные разрывы	1000
повреждение оснований	500
сшивки ДНК-белок	150
двунитиевые разрывы	40

Важным последствием облучения является изменение эпигеномной (не связанной с ядром) наследственности клетки, носителем которой являются цитоплазматические органеллы. При этом снижается функциональная активность потомков облученных клеток, в чем может состоять одна из причин отдаленных последствий облучения (Таб.8). Но главной причиной гибели клеток при облучении является повреждение ее генетического аппарата.

Таблица 8

Стадии радиобиологические процессов, протекающих в клетке

Стадия	Время протекания, с	Основные процессы
Физическая, физико-химическая	$10^{-18} - 10^{-8}$	Ионизация, образование радикалов (соединений с ненасыщенной химической связью)
Химическая, биохимическая	$10^{-14} - 10^{-4}$	Образование первичных повреждений ДНК (одно- двунитиевые разрывы, вследствие реакции со свободными радикалами)
Биохимическая (субклеточная)	$10^{-4} - 10^5$	Восстановление (репарация) повреждений. Образование нерепарируемых повреждений (мутаций)
Биологическая (клеточная)	$10^3 - 10^8$	Гибель клеток или изменение их свойств в результате мутаций

### Механизмы восстановления радиационных повреждений клетки

Конечный эффект облучения является результатом не только первичного повреждения, но и последующих процессов восстановления (репарации). Предполагается, что значительная часть первичных повреждений в клетке возникает в виде так называемых *потенциальных* повреждений.

Потенциальные повреждения - формальное понятие, которое не определяет какое-либо конкретное повреждение и поэтому может применяться к любому виду радиационных поражений.

Потенциальные повреждения реализуются в случае отсутствия восстановительных процессов. Реализации восстановительных процессов способствует биосинтез белков и нуклеиновых кислот. Пока не произошла натурализация потенциальных повреждений, клетка может восстановиться. Восстановление связано с ферментативными реакциями и обусловлено энергетическим обменом. В основе этого явления лежит деятельность систем, которые в обычных условиях регулируют интенсивность естественного мутационного процесса.

Поскольку повреждение молекул ДНК определяет жизнеспособность клетки, то от ее репарации зависит выживаемость клетки.

По времени осуществления различают дорепликативную, пострепликативную и репликативную репарации.

*Дорепликативная репарация* (до этапа удвоения молекулы ДНК) происходит путем воссоединения разрывов, а также с помощью удаления (эксцизии) поврежденных оснований. В воссоединении разрывов участвуют несколько ферментов. В более простых случаях участвует один фермент – лигаза. В сложных случаях (двунитчатые разрывы) восстановление осуществляется полной ферментативной системой репарации с участием ферментов эндонуклеазы, экзонуклеазы, ДНК-полимеразы и других ферментов, обеспечивающих подготовку концов ДНК, для лигазного этапа репарации.

Вместе с разрывами ДНК после облучения возникают множественные повреждения оснований, последние ликвидируются системой *эксцизной репарации*. Эксцизная репарация осуществляется с помощью репаративного синтеза, который представляет собой многоэтапный процесс по типу выщепление – замещение. Вначале повреждение узнается специфической  $\gamma$ -эндонуклеазой, после чего происходит выщепление (инцизия) поврежденного участка вблизи измененного основания, затем - экзонуклеотидная деградация поврежденной цепи с захватом смежных неповрежденных нуклеотидов и, в завершении, - репаративный синтез в области образовавшегося дефекта при участии ДНК-полимеразы 1 и полинуклеотидлигазы комплементарного участка неповрежденной цепи ДНК в качестве матрицы (шаблона).

*Пострепликативная репарация* объясняется тем, что некоторые клетки млекопитающих выживают при большой дозе излучения, несмотря на пониженную способность к удалению пиримидиновых димеров. Механизм этого вида репарации точно

не изучен. Предполагают разные варианты синтеза ДНК на поврежденной матрице. Первые исследования пострадиационного восстановления клетки (В.И. Корогодин 1962 - 1964 гг.) показали, что восстановление дрожжевых клеток, облученных на стадии  $G_1$ , может идти не только до и во время пострадиационного синтеза ДНК, но и после него, а потенциальные повреждения переходят в необратимую форму только во время первого пострадиационного деления ядра. Пострепликативную репарацию оценивают (В. Комари, К. Ханосон, 1980) не как истинное восстановление, а как преодоление повреждений - процесс, при котором клетка сохраняет жизнеспособность, несмотря на наличие дефектов в ДНК. Сохранение изменений структуры ДНК в поколениях клеток могут быть причиной отдаленных последствий радиационного воздействия.

*Реплекативная репарация* – восстановление ДНК в процессе ее удвоения. Этот тип репарации осуществляется удалением в ходе репликации повреждений в зоне точки роста цепи либо продолжающейся элонгацией в обход повреждений.

Несмотря на существенный прогресс в изучении проблемы репараций в настоящее время нерешенными остаются многие вопросы, касающиеся молекулярных механизмов этого процесса и его роли в пострадиационной выживаемости клеток. Результаты экспериментов показывают, что связь восстановления одиночных разрывов ДНК не однозначна. С одной стороны репарация одиночных разрывов происходит в течение получаса, т.е. быстрее, чем восстанавливается сама клетка, с другой стороны полная репарация разрывов наблюдается при очень больших дозах, порядка десятков грей, при которых выживают лишь одиночные клетки. Пока нет точных данных о том, что восстановленная ДНК обладает теми же свойствами, что и исходная.

Процесс репарации повреждений ДНК - процесс метаболический. Она осуществляется ферментами, которые постоянно присутствуют в клетке и участвуют как в ее нормальном метаболизме, так и в ходе восстановления от различных повреждений как радиационного, так и нерадиационного характера. Для работы ферментов участвующих в репарации требуется энергия. Если подвить образование АТФ, к примеру фторидом натрия, то скорость восстановления снижается. При небольшом уменьшении общей скорости метаболизма, например понижением температуры до комнатной, эффективность восстановления не меняется. При снижении температуры до 20 °C наблюдается временная задержка в восстановлении некоторых клеток. Интенсивность значительно снижается при 8 °C, а при 2 – 5 °C приостанавливается.

## Радиочувствительность организмов

*Радиочувствительность организмов.* Действие ионизирующего излучения на многоклеточный организм проявляется не только в реакциях, развивающихся в отдельных клетках и тканях, но и благодаря связям их физиологических функций в организме – в общих реакциях, присущих организму как единой и сложной биологической системе.

Существует определенная зависимость между степенью и уровнем развития организмов и их радиочувствительностью. Так одноклеточные организмы значительно более устойчивы, чем многоклеточные, особо высокой чувствительностью обладают млекопитающие.

В качестве критерия радиочувствительности используется такой показатель как ЛД<sub>50/30</sub> – летальная доза облучения, которая вызывает 50% гибель за 30 суток. Ее еще называют средней летальной дозой. Противоположным термином радиочувствительности служит понятие «радиостойчивости» или «радиорезистентности».

Причины различия в чувствительности живых организмов полностью не выяснены. Различную радиочувствительность холоднокровных и теплокровных организмов пытаются объяснить низкой температурой тела и медленным обменом веществ у холоднокровных. Однако температура тела и обмен веществ выше у птиц, но они более устойчивы к действию излучения, чем млекопитающие.

Устойчивость к облучению насекомых и ракообразных объясняется присутствием в их организме повышенного количества ряда веществ, которые обладают защитным действием. Так насекомые обладают высоким уровнем содержания каталазы, расщепляющей перекиси. У ракообразных определенным защитным свойством обладают аминокислоты, амины и полипептиды, участвующие в регуляции осмотического давления.

Определенную роль в радиочувствительности играет число хромосомных наборов в клетках организма. Так диплоидные клетки более устойчивы к действию ионизирующих излучений, чем гаплоидные.

В таблице 9 представлены сведения различных авторов о радиопоражаемости некоторых видов живых организмов к дозам гамма-излучения, вызывающим 50% гибель. Различия в радиостойчивости в пределах разных биологических видов называют *видовой радиочувствительностью*. Однако даже в пределах одного вида степень радиочувствительности сильно варьирует и ее называют *индивидуальной радиочувствительностью*. Кроме того, различают также *возрастную и половую*

*радиочувствительность.* Так молодые организмы более радиочувствительные, чем взрослые или старые, так как у них в силу своего роста более высокий уровень клеточного деления в органах и тканях и, следовательно, клетки такого организма более радиопоражаемые. Однако способность к пострadiационному восстановлению у них выше по той же причине. Женские особи более радиорезистентны, чем мужские, так как считается, что женские половые гормоны обладают радиозащитными свойствами.

Таблица 9

Диапазон радиочувствительности в природе

Биологический вид	ЛД <sub>50/30</sub> , Гр
Парамеция	3000,0
Растения	10,0-1500,0
Амеба	1000,0
Насекомые	10,0-100,0
Дрожжи	300,0
Бактерия Коли	100,0
Улитка	100,0
Змеи	80,0-200,0
Тритон	30,0
Птицы	8,0-20,0
Черепаша	15,0
Рыбы	8,0-20,0
Кролик	9,0-10,0
Хомяк	9,0-10,0
Мыши разных линий	6,0-15,0
Крысы разных линий	7,0-15,0
Обезьяны разных видов	2,5-6,0
Осел	2,0-3,8
Коза	3,0-3,5
Собака	2,5-3,5
Свинья	5,0-6,0
Овца	3,5-4,0



Лошадь	4,5-5,5
Крупный рогатый скот	4,5-5,5
Человек	3,0-4,5

Механизмов, объясняющих естественную радиочувствительность биологических объектов в настоящее время пока нет, хотя многие аспекты изучены в достаточной степени, также отсутствует гипотеза более или менее объясняющий этот феномен. Ясно одно, что млекопитающие и человек обладают наибольшей чувствительностью к облучению по сравнению с другими типами организации живой материи.

### **Модификация радиочувствительности**

Существующие живые организмы в сотни и тысячи раз различаются по степени чувствительности к радиационному воздействию. Помимо генетически детерминированных различий, наблюдаемых у объектов из разных филогенетических групп, возможны значительные вариации радиочувствительности у особей одного вида, которые находятся в неодинаковых условиях питания, аэрации, температуры, сезона года и т.д. Кроме того, степень лучевого поражения организмов связана с возрастом, полом, физиологическим состоянием, интенсивностью пролиферативных процессов, активностью метаболических систем и другими факторами. За счет различных внешних воздействий может быть достигнута избирательная регуляция многих перечисленных процессов. Это создает предпосылку для модификации радиочувствительности организмов.

В облученном организме наряду с развитием первичных радиационных повреждений протекают восстановительные процессы, включающие репарацию повреждений ДНК и хромосом, восстановление повреждений клеток, размножение и дифференцировку непораженных стволовых клеток и другие, пока еще малоизученные эффекты. Установлено, что целый ряд химических веществ может влиять на характер и интенсивность протекания репаративных процессов, что создает еще одну предпосылку для направленной модификации радиочувствительности организмов.

Искусственная модификация радиочувствительности базируется на результатах биофизических исследований на молекулярном и субклеточном уровнях. Анализ этих исследований позволил установить причинную связь между степенью лучевого поражения организмов и характером начальных физико-химических процессов, включающих миграцию поглощенной энергии излучения, радиолиз воды и органических молекул, перекисное окисление липидов, реакции свободнорадикальных продуктов,

формирование структурных повреждений ДНК, белков, липидов и других жизненно важных макромолекул и молекулярных комплексов в клетке. Интенсивность и характер протекания перечисленных процессов зависят от того химического "фона", на котором разворачиваются начальные физико-химические реакции, определяющие биологические эффекты облучения. Различными внешними воздействиями, в первую очередь введением в организм ряда химических соединений, можно прямо или опосредованно создать в клетках и тканях условия, способствующие или затрудняющие реализацию лучевых повреждений, и таким образом либо понизить устойчивость биологических объектов к действию радиации, либо сделать их более радиорезистентными.

*Усиление поражающего действия радиации.* При усилении эффекта радиационного воздействия химическими соединениями различают:

- 1) синергетическое действие (потенцирование), когда комбинированный эффект двух агентов выше, чем суммарное действие каждого из них, определенное в отдельности;
- 2) аддитивное действие, при котором комбинированное действие двух агентов равно сумме эффектов, вызываемых каждым из них в отдельности (в этих случаях подразумевается, что химические соединения сами оказывают определенное действие);
- 3) сенсibilизация, когда химическое соединение само неактивно, но при совместном действии с облучением увеличивает его эффективность.

В целом же все вещества, усиливающие радиационный эффект называются радиосенсibilизаторами.

Их насчитывается довольно много, основные из них: йодацетамид, йодуксусная кислота, производные хинонов, карбонильные соединения, кетоальдегиды, производные ацетофенона, нитрофураны, нитроимидазолы. Все они способны подавлять синтез ДНК, РНК, ингибировать Н-группы.

Вещества, способные усиливать действие излучения, а также вызывать многочисленные эффекты, имитирующие действие ионизирующей радиации, получили название *радиомиметики*. Они способны, как и ионизирующие излучения, вызывать мутагенное действие, подавлять рост опухолей, повреждать хромосомы, блокировать митозы и так далее. К радиомиметикам в основном относят те вещества, химическая природа которых близка к иприту (боевое отравляющее вещество) и перекисям.

*Ослабление поражающего действия радиации.* Способность химических соединений снижать лучевое поражение простых молекулярных систем впервые была продемонстрирована В. Дэйлом в 1940 году. Изучая механизмы непрямого действия радиации на растворы ферментов, он показал, что тиомочевина, коллоидная сера

уменьшают степень радиолиза ферментов, и предположил, что наблюдаемый защитный эффект осуществляется в результате конкуренции за свободные радикалы воды, возникающие при ее радиолизе. В 1948 г. Р. Латарже описал радиозащитное действие цистеина, глутатиона, триптофана и других веществ в опытах с бактериофагом. Так в радиобиологии сформировалось представление о "защитных веществах" и "химической защите" от облучения.

В 1949 году в двух лабораториях мира, независимо друг от друга, было сделано важное открытие (Нобелевская премия): Х. Патт с сотрудниками обнаружили, что цистеин защищает крыс от лучевого поражения, а З. Бак и А. Эрв сообщили о радиозащитном действии цианида в опытах на мышах.

В начале 50-х годов в лаборатории З. Бака были выявлены противолучевые свойства цистеина, серотонина, гистамина, триптамина, норадреналина, тирамина. Все исследованные препараты были эффективны только при введении животным до облучения, поэтому они получили название *радиопротекторы*. Радиопротекторы - вещества, которые способствуют выживанию организмов при введении за определенное время до облучения.

На сегодняшний день испытано более 30 тысяч различных фармако-химических соединений, обладающих радиозащитным действием. Наиболее перспективные и высокоэффективные относятся к двум классам соединений:

- *индолилалкиламины* (производные триптамина, серотонина, мексамина);
- *меркаптоалкиламины* (цистеин, цистамин, 2-меркаптоэтиламин, меркаптопропиламин, миноалкилтиофосфат, аминоэтилизотиуроний).

По мнению ряда исследователей, *противолучевая защита* радиопротекторов направлена, в первую очередь, на снятие прямого и косвенного действия радиации в период первичной реакции на облучение и включает следующие механизмы:

- перехват и инаktivация свободных радикалов и активных продуктов радиолиза воды;
- снижение окислительно-восстановительного потенциала клеток;
- увеличение содержания тиольных групп в организме;
- увеличение содержания эндогенных аминов;
- снижение уровня продуктов окисления липидов;
- перевод различных биохимических систем в состояние повышенной радиорезистентности (этот процесс называется биохимическим шоком - вызывается ожогом, сильным действием токсических веществ);

- снижение парциального давления кислорода в клетках и тканях (кислородный эффект).

В настоящее время определенного внимания заслуживает гипотеза эндогенного фона радиорезистентности, сформулированная Ю. Б. Кудряшовым и Е. Н. Гончаренко в 1969 году, обоснованность которой подтверждается и поныне в экспериментах. Согласно этой гипотезе, устойчивость биологических объектов и систем к действию ионизирующей радиации определяется рядом эндогенных веществ, способных влиять на зарождение и развитие первичных лучевых процессов. Гипотеза рассматривает возможность модификации лучевого поражения за счет мобилизации внутренних ресурсов организма эндогенными радиозащитными и радиосенсибилизирующими веществами. К числу эндогенных защитных соединений помимо тиолов авторы гипотезы относят биогенные амины: серотонин, гистамин, дофамин, норадреналин, адреналин. Их противолучевая активность хорошо известна, однако ранее эти вещества практически не были изучены в качестве возможных участников опосредованного действия вводимых в организм радиозащитных соединений.

В качестве эндогенных сенсибилизаторов радиационного воздействия рассматриваются продукты перекисного окисления липидов, главным образом, гидроперекиси и перекиси ненасыщенных высших жирных кислот.

По мнению авторов гипотезы, не только искусственно модифицируемая радиорезистентность, но и природная, определяется соотношением уровней эндогенных защитных и сенсибилизирующих веществ. Это соотношение было обозначено как "регуляторный комплекс", определяющий устойчивость биологических объектов к действию радиации.

Е. Н. Гончаренко и сотр. показали, что содержание серотонина в тканях радиорезистентных грызунов в 3 - раз выше, а гистамина в 2 - 3 раза выше, чем в тех же тканях у крыс, более чувствительных к действию радиации.

Каким же образом реализуется противолучевой эффект биогенных аминов? Заслуживают внимания три пути реализации эффекта в организме животных:

- за счет "кислородного эффекта", связанного с сосудосуживающим действием этих соединений (гипоксическое действие);
- за счет прямого влияния биогенных аминов на перекиси в процессе перекисного окисления липидов;
- в результате участия биогенных аминов в регуляции клеточного обмена.

Эффективными радиопротекторами оказались специфические биостимуляторы иммунных реакций - вакцинные препараты, культуры бактерий, антигенные комплексы, такие, как полисахариды, полипептиды. Сибиреязвенная вакцина СТИ, вакцины из сальмонелл, шигелл, различных анаэробов обладают выраженным радиозащитным действием. Хорошим радиозащитным эффектом обладает поливалентная паратифозная вакцина. В отличие от химических преимущество биологических протекторов состоит в том, что они обладают длительным защитным эффектом - недели и даже месяцы. В настоящее время разрабатываются различные гипотезы механизма действия биологических радиопротекторов. Но в основном они сводятся к тому, что в иммунном организме происходит частичное связывание "лучевых антигенов" специфическими антителами, присутствующими в организме в момент облучения.

*Адаптогены* - вещества растительного или биологического происхождения, которые применяются длительное время для повышения, как общей резистентности организма, так и радиорезистентности.

Для повышения резистентности при хроническом облучении живых организмов широкое применение получили адаптогены - это зоопрепараты, фитопрепараты, многокомпонентные смеси, иммуномодуляторы, общим свойством которых является их способность стимулировать возрастание уровня эндогенного фона радиорезистентности; активировать антиокислительные, а также и репаративные процессы систем, мобилизовать противолучевые и общебиологические защитные ресурсы организма. Среди них особый интерес вызывают фитопрепараты природного происхождения, поскольку они более доступны, как правило, не токсичны, а потому их применение не вызывает побочных эффектов. Доказательством тому является успешное применение препаратов женьшеня, элеутерококка, китайского лимонника для повышения как общей резистентности, так и радиорезистентности организма. Фитопрепараты природного происхождения относят к препаратам народной медицины и среди них особо выделяют две группы: алкалоиды, полисахариды.

Фитоалкалоиды, выделенные из корней бобового растения *Sophora flavescens*, из капусты огородной, брюквы, редьки, жирушника, из семян *Forsythiae suspense*, обладают радиопрофилактическим действием. Алкалоидные экстракты из *Herbas thermopsis*, *Rhizoma coridaly humosae*, *Semen iridis*, *Oleum curcumae aromaticaе*, *Radix codonopsis pilosulae*, *Herbas artemisiae annuae*, *Folium camelliae sinensis*, *Venenum bufonis* способны вызывать и длительно поддерживать состояние повышенной общебиологической устойчивости к неблагоприятным факторам среды и ионизирующим излучениям.

Из фитополисахаридов, обладающих радиопрофилактическим действием, заслуживают внимания экстракты из древесных съедобных грибов – *Auricularie auricular Judae*, лишайников – *Paramilla tinctorum*, плавунов – *Lycopodium tinctorum Desper*, а также и растений – *Lobaria pulmonaria Hollm*, *Bupleurum Chinese* и др. Фитополисахаридные экстракты, обладающие радиотерапевтическим действием, представлены семейством трихоломовых древесных съедобных грибов и другими растениями: *Armillaria meilia Karst* - осенний огонек; *Hericium crinacium Pers* - ежовник; *Polyporis bellatus*- гаметохетовый гриб; *Thallus laminafriaee* - морская капуста; *Fructificatia ganodermae* - лечебная трава. Экстракты из дрожалковых съедобных грибов - *Tremella fucitormis Berk* - активны как радиопротекторы и как лечебные средства.

### Вопросы и задания

1. Пусковые (первичным) этапы лучевого поражения
2. Какие виды излучений в большей степени вызывают двойные разрывы ДНК
3. Какой показатель является критерием радиочувствительности
4. Биологические системы каких уровней организации более радиорезистентны к действию ИИ
5. Какие организмы более радиочувствительны к действию ИИ
6. Что относят к ранним лучевым повреждениям кожного покрова
7. Какие виды излучений наиболее опасны для формирования катарактогенной дозы человека.
8. С каким периодом полураспада представляют наибольшую опасность для организмов инкорпорированные радиоактивные изотопы:
9. Какая концепция принята для целей нормирования концентрогенного действия радиации

Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение.

### Список литературы

1. Кудряшев Ю.Б. Радиационная биофизика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.-448с.
2. Руднев А.В. Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
3. Василенко О.В. Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
4. Пивоваров Ю.П., Михалев В.П. Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. Алексахин Р.М. Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
6. Кривоуцкий Д.А. Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999.-384 с.
7. Ильенко А.И., Кривоуцкий Д.А. Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
8. Кривоуцкий Д.А. Радиоэкология сообществ наземных животных. М. Энергоатомиздат, 1983.- 96 с.
9. Кривоуцкий Д.А. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Кривоуцкий Д. А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. М. Наука, 1988. - 240 с.
10. Сахаров В.К. Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
11. Сафонова В.Ю., Сафонова В.А. Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.

### **Использованные информационные ресурсы**

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## Лекция 5.

### Лучевая болезнь

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы лучевой болезни, внутреннее облучение организма, отдаленные последствия облучения, принципы лечения лучевой болезни и действие малых доз радиации.

**Ключевые слова.** Радиационная катаракта, злокачественные новообразования, сокращение продолжительности жизни, терапия, радиационный гормезис.

#### **Методические рекомендации по изучению темы**

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются вопросы к лекции и тесты

Лучевая болезнь это сложный комплекс изменений, развивающийся в организме после воздействия на него ионизирующего излучения. Закономерности развития лучевой болезни определяются величиной и мощностью дозы ионизирующего излучения (чем она больше, тем острее и в более короткие сроки протекает болезнь), зависят от распределения поглощенной энергии излучения в организме и радиочувствительности его органов, тканей и систем. Степень тяжести лучевой болезни неодинакова в зависимости от того, был ли облучен весь организм (тотальное, или общее облучение) или его отдельные участки (локальное облучение); однократно или многократно (хроническое облучение); с интервалами во времени (фракционное, или дробное облучение) или без них. Человек легче переносит локальное облучение серией небольших доз, чем ту же дозу, полученную при общем и однократном облучении. Следует учитывать способ облучения: воздействие внешнего источника ионизирующего излучения (внешнее облучение) или радионуклидов, попавших внутрь организма (внутреннее облучение). Существенным является и распределение радиоактивных веществ в организме. При равномерном распределении в организме инкорпорированного (попавшего внутрь) цезия-137 картина заболевания сходна по клиническим признакам с лучевой болезнью, возникающей вследствие внешнего облучения (воздействие рентгеновского или гамма-излучения). Другие радионуклиды могут вызывать избирательное поражение органов: стронций-90 накапливается преимущественно в костях, плутоний-239 — в легких, йод-131 — в щитовидной железе и т. д.

Различают два основных вида лучевой болезни: острая, вызываемая кратковременным облучением в больших дозах, и хроническая, возникающая при продолжительном облучении в относительно невысоких дозах.



*Острая лучевая болезнь.* Это сложный комплекс изменений, развивающийся в организме после однократного или повторного облучения в относительно короткий промежуток времени. При ядерных взрывах к однократному облучению принято относить непрерывное облучение в течение первых четырех дней после взрыва.

Течение острой лучевой болезни в основном изучалось в экспериментах на животных, а также на основе наблюдений за облученными людьми. В результате были выявлены характерные черты проявления болезни: по степени тяжести, формам проявления и периодам течения.

По тяжести заболевания человека различают четыре степени острой лучевой болезни (ОЛБ):

<i>Легкая степень (1)</i>	—	диапазоне доз 1- 2 Гр;
<i>Средняя степень (2)</i>	—	2 – 4 Гр;
<i>Тяжелая степень (3)</i>	—	4 – 6 Гр;
<i>Крайне тяжелая степень (4)</i>	—	выше 6 Гр.

В зависимости от диапазона доз выделяют четыре основные формы острой болезни человека: костномозговая, кишечная, сосудистая и нервно - церебральная. Та или иная форма болезни имеет название того органа или системы, который поражается в наибольшей степени. Их повреждение при соответствующем диапазоне доз является главным механизмом поражения и обуславливает течение и исход болезни. Такие органы, ткани и системы получили название критических.

Дозы в пределах 1 - 10 Гр вызывают костномозговую форму - при которой критической системой являются органы кроветворения, главным образом клетки костного мозга. Массовая гибель клеток костного мозга, а также замедление клеточного деления является причиной недостаточного поступления форменных элементов в кровяное русло. В таких условиях гибель наступает в течение 1- 2 месяцев после облучения в зависимости от тяжести болезни.

Диапазон доз 10 - 20 Гр оказывается достаточным для решающих повреждений другой критической системы – кишечной (кишечная форма). Основная причина гибели организма - клеточное опустошение кишечника в течение второй недели после облучения при этих дозах.

Воздействие в дозах 20 – 80 Гр сильно повреждает кровеносные сосуды и вызывает накопление продуктов клеточного распада, которые являются токсическими в такой степени, что это является причиной скорой гибели организма через 4 - 7 суток.

Очень высокие дозы (100 Гр и выше) вызывают серьезные изменения в центральной нервной системе (церебральная форма), проявляющиеся судорогами и коллапсом смерть наступает в течение 1 - 3 суток после облучения.

В развитии острого течения лучевой болезни также выделяют 4 периода.

Первый – начальный или период первичных реакций на облучение.

Второй - латентный (скрытый) или период кажущегося благополучия.

Третий – период разгара болезни или выраженных клинических признаков.

Четвертый – период восстановления с полным или частичным выздоровлением.

Периодичность протекания ОЛБ отражает последовательность смены отдельных патологически проявлений в организме, острота которых зависит от степени тяжести болезни (легкая, средняя, тяжелая или крайне тяжелая) и от величины и мощности дозы.

Первичная реакция организма человека возникает в зависимости в первые минуты – часы и проявляются во всех случаях облучения при дозах превышающих 2 Гр.

В этой фазе болезни проявляется тошнота, рвота, понос, исчезает аппетит, ощущается сухость в ротовой полости. Пострадавшие испытывают чувство тяжести в голове, головную боль, общую слабость, сонливость. Такое состояние характеризуется термином «лучевое похмелье» - ощущение близкое к алкогольному похмелью.

При дозах облучения более 10 Гр развивается шокообразное состояние с падением артериального давления, потерей сознания и повышением температуры тела. На участках кожи, у подвергшихся облучению в дозах 6 – 10 Гр возникает гиперемия по типу загара. В периферической крови в этот период наблюдается нейтрофильный лейкоцитоз со сдвигом ядра влево, а также абсолютная и относительная лимфопения. Из биохимических показателей в крови моче можно отметить повышение уровня сахара, а также аминокислотурию, вследствие распада белка разрушающихся клеток.

Клинические проявления первой фазы острой лучевой болезни являются не только следствием повреждения радиочувствительных систем, но и четко свидетельствует о ранних нарушениях нервнорегуляторных взаимоотношениях (диспептические, сосудистые расстройства, головокружение и т.д.). Продолжительность начального периода составляет 1 – 3 суток.

Через 2-4 дня симптомы первичной реакции исчезают, самочувствие нормализуется. Болезнь вступает во вторую фазу лучевого поражения, называемую скрытой или латентной из-за отсутствия видимых клинических признаков болезни.

Продолжительность латентного периода зависит от тяжести поражения и колеблется у человека от 14 до 32 суток. При дозах лучевого воздействия свыше 10 Гр скрытый период и вовсе отсутствует.

Из клинических признаков во время этой фазы наблюдается выпадение волос. В крови обнаруживается лимфопения, тромбоцитопения, позднее нейтрофилопения. В костном мозге ярко выражена аплазия. В этой фазе отмечается также подавление стадий сперматогенеза, может наблюдаться выпадение цикла месячных.

Через 2 – 4 недели после облучения состояние больных резко ухудшается, нарастает слабость, повышается температура, т.е. наступает период разгара лучевой болезни. Возникает геморрагический синдром – кровоизлияния в кожу, слизистые оболочки, в желудочно-кишечный тракт, мозг, сердце, легкие. Опасность кровотечений и возникновения осложнений составляет основную угрозу жизни в этот период.

Морфологический состав крови представлен одними лимфоцитами, так как остальные элементы белой крови исчисляются единицами или исчезают совсем, это приводит к относительному лимфоцитозу при абсолютной лимфопении. Кроме того, в системе кроветворения наблюдаются гипопроотеинонемия и гипоальбуминемия. Отражением нарушения обмена веществ и диспептических расстройств является снижение массы тела. У выживших больных третий период продолжается от одной до трех недель, затем переходит в период восстановления.

Ранний период восстановления, продолжительность которого составляет 2 – 3 месяца, характеризуется нормализацией температуры, улучшением самочувствия, появлением аппетита, восстановлением сна. Прекращается кровоточивость, исчезают или прекращаются диспептические явления. Как правило, возрастает масса тела. Происходит постепенное восстановление показателей крови, которые у выживших начинается еще в разгаре заболевания вследствие репаративных процессов в костном мозге. Самочувствие становится удовлетворительным, однако отдельные проявления поражения еще имеет место. Например, продолжается облысение, рост волос возобновляется только к четвертому месяцу, лишь к 4 – 6 месяцу нормализуется способность к воспроизводству.

Период восстановления при легкой степени ОЛБ происходит довольно быстро и достаточно полно. В случае средней степени тяжести болезни, выздоровление наблюдается в течение 3 – 6 месяцев, иногда болезнь приобретает хроническую форму. При тяжелой форме болезни восстановительный период длится 8 – 9 месяцев и полное выздоровление обычно не наступает. Сохраняется повышенная чувствительность к заразным и незаразным болезням, ослабляется воспроизводительная способность,

сокращается продолжительность жизни и т. д. Острая лучевая крайне тяжелой формы ОЛБ длится 10 – 20 дней и обычно заканчивается гибелью. Смерть наступает в основном в третьей фазе болезни.

С точки зрения прогноза ОЛБ В. Бонд с соавторами предлагают различать четыре категории:

- выживание невозможно;
- выживание возможно;
- выживание вполне вероятно;
- выживание несомненно;

При равномерном облучении основной массы тканей тела дозой 5 - 6 Гр *выживание невозможно*, несмотря на медицинский уход и самую совершенную терапию. Однако надо отметить, что выживание возможно и при более высоких дозах в случае неравномерного облучения.

При дозах 2 – 4,5 Гр *выживание возможно*, несмотря на тяжелое поражение, в случае своевременного и квалифицированного лечения.

При дозах 1 – 2 Гр *выживание вполне вероятно* без специального лечения, поскольку поражение не так сильно вызывает угнетение образования форменных элементов крови, число которых спонтанно восстанавливается. Однако в некоторых случаях восстановление может затянуться.

При дозах менее 1 Гр *выживание несомненно* из-за своевременного восстановления кроветворения, клинические симптомы не требуют медицинского вмешательства, несмотря на то что в крови обнаруживается длительное падение числа лимфоцитов.

Таким образом, исход болезни и возможность выживания при облучении организма в данных диапазонах доз главным образом связана с репаративными процессами костного мозга, а лечебные мероприятия, направленные на восстановление гемопоэза повышают вероятность выживания.

*Хроническая лучевая болезнь.* Хроническая лучевая болезнь - самостоятельная нозологическая форма лучевого поражения, которая развивается в результате длительного облучения организма в малых дозах (0,1 - 0,5 сГр/сут) при суммарной дозе, превышающей 0,7-1 Гр. Она может быть вызвана как внешним, так и внутренним облучением, относительно равномерным или неравномерным, общим или локальным.

Нельзя путать эту форму лучевого заболевания с отдаленными последствиями острого облучения и поражениями, возникающими при повторных облучениях.

Хроническая лучевая болезнь при общем внешнем облучении представляет собой сложный клинический синдром с вовлечением большинства органов и систем, характеризующийся периодичностью течения, связанной с продолжением или прекращением облучения.

Своеобразие хронической лучевой болезни состоит в том, что в активно профилирующих тканях, благодаря интенсивным процессам клеточного обновления длительное время сохраняется возможность восстановления тканевой организации. В тоже время стабильные системы, такие как нервная, сердечно-сосудистая и эндокринная отвечает на хроническое лучевое воздействие сложным комплексом функциональных реакций и медленным нарастанием дистрофических процессов.

Протекание хронической лучевой болезни, в отличие от острой, более растянуто во времени, однако все же можно отметить периодичность развития, связанную с динамикой поглощения энергии излучения органами и тканями. Для хронической лучевой болезни характерно медленное нарастание тяжести повреждений и более продолжительный период восстановительных процессов. Клиническая картина характеризуется выраженным астеническим синдромом и умеренным снижением количества лимфоцитов и других форменных элементов крови (цитопения). При общем длительном облучении цитопения может либо долго сохраняться, либо незначительно прогрессировать; меняется артериальное давление и частота пульса (чаще уменьшается); изменяется моторика желудочно-кишечного тракта; снижается ферментативная и гормональная функция; может наблюдаться сходство со стрессорным ответом организма на раздражители. При внутреннем или локальном внешнем облучении протекание хронической лучевой болезни зависит от распределения источников излучения в органах и радиочувствительности последних.

При нормировании неравномерного действия ионизирующего излучения, проводящегося в целях радиационной безопасности, к критическим относят такие облученные участки организма, которые могут причинить наибольший ущерб здоровью человека или его потомству. В этом случае критические органы делят на 3 группы. К первой, наиболее радиочувствительной, относят красный мозг и гонады (половые железы); ко второй, менее радиочувствительной - щитовидную железу, желудочно-кишечный тракт, легкие, хрусталик и мышцы и другие органы, не входящие в первую и третью группы; к третьей, наиболее радиоустойчивой группе, относят кожный покров, костную ткань, кисти предплечья, голени и стопы.

Профилактика хронической лучевой болезни состоит в строгом соблюдении нормативов и правил работы с радиоактивными источниками.

Важнейшей специфической чертой лучевой болезни (хронической и острой) можно считать отдаленные последствия облучения, возникающие у людей и их потомства спустя 10 - 20 и более лет после облучения. К таким последствиям обычно относят раковые заболевания, катаракты, генетические нарушения, сокращение средней продолжительности жизни.

### **Внутреннее облучение инкорпорированными радиоактивными веществами**

Под внутренним облучением в отличие от внешнего понимают процесс, при котором источники излучения находятся внутри организма, попадая в него различными путями.

Данное отличие обуславливается рядом особенностей. Первая состоит в том, что увеличивается время облучения тканей организма, так как в отличие от внешнего облучения, при котором доза формируется за счет времени пребывания в поле радиационного воздействия, при внутреннем облучении она определяется сроком пребывания радиоактивного вещества в организме. Следующая особенность заключается в непосредственной ионизацией ткани за счет контакта с ней радиоактивных веществ и передачи ей всей энергии излучения, а также увеличении телесного угла до  $4\pi$  геометрии в отличие от внешнего, при котором угол облучения может быть значительно меньшим. В - третьих существенное значение приобретает роль альфа - излучающих радионуклидов, попавших в организм, из- за высокой плотности ионизации на единицу пробега  $\alpha$ -частиц, а следовательно и биологической эффективностью, несмотря на их малую проникающую способность. Другая особенность биологического действия инкорпорированных излучений определяется тем, что в отличие от внешнего облучения, при котором роль организма пассивна, при внутреннем облучении организм играет активную роль в формировании тканевых доз (из-за транспортных и метаболических процессов, обуславливающих накопление и выведение радионуклидов из определенных органов и тканей). И, наконец, в случае внутреннего облучения, не эффективны методы защиты, применяемые при внешнем облучении: экранирование, сокращение времени пребывания в радиоактивном поле, удаление от источника излучения.

Биологический эффект от инкорпорированного действия радиоактивных веществ определяется рядом параметров:

- *путь поступления радиоактивного вещества в организм;*
- *тип распределения в органах и тканях;*

- период полураспада и скорость выведения радиоактивных веществ из организма;

*Пути поступления.* Радиоактивные вещества в организм могут поступать тремя путями: через легкие, с пищей и водой в желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), и через кожу. Наиболее важными и потенциально опасным является *ингаляционный* путь поступления радиоактивных веществ, так как площадь дыхательной поверхности альвеол легких составляет примерно  $100 \text{ м}^2$  и она в 50 раз превышает площадь поверхности кожи.

Во вдыхаемом воздухе могут присутствовать радиоактивные газы и аэрозоли в виде пыли, тумана или дыма. Степень проникновения радиоактивных веществ зависит от размера радиоактивных частиц, агрегатного состояния радионуклида (газообразные, растворимые, нерастворимые), минутного объема вдыхаемого воздуха, частоты дыхания. Пылевые частицы, на которых сорбированы радионуклиды, диаметром менее 0,5 мкм легко проникают в легкие и также легко покидают их, не задерживаясь. Частицы размером от 0,5 мкм до 1 мкм задерживаются в легких на 90 %, пылинки размером более 5 мкм фиксируются до 20 %. Более крупные пылевые частицы, оседают в верхних дыхательных путях, отхаркиваются, затем заглатываются и далее поступают в желудок.

Задержавшиеся в альвеолах легких радиоактивные частицы быстро всасываются в кровь, однако определенная их часть фиксируется макрофагами, в результате чего в легочной ткани может создаваться радиоактивность на длительное время.

Газообразные радиоактивные вещества очень быстро всасываются в кровь и распространяются по всему организму. Хороши растворимые вещества, также быстро резорбируются в кровяное русло, затем, в процессе обмена веществ откладываются в определенных органах и системах организма.

При попадании короткоживущих и при этом хорошо задерживающихся в органах дыхания радиоактивных веществ, они по лучевой нагрузке становятся критическими.

Второй по значимости поступления радионуклидов – с пищей и водой. Поведение радиоактивных веществ, при этом пути поступления в организм зависит от их растворимости в среде желудочно-кишечного тракта, которая в различных ее участках имеет разные показатели pH. Например, многие растворимые соединения редкоземельных и трансурановых элементов, в частности плутония, при щелочном pH кишечника образуют нерастворимые гидрооксиды. Есть и обратный процесс, когда слабо растворимые в воде вещества, в среде ЖКТ переходят в растворимые компоненты, хорошо всасывающиеся в кровь через стенки кишечника. Степень всасывания радиоактивных веществ, поступающих с пищей и водой, зависит так же от химической характеристики соединения и физиологического состояния организма. Особенно легко

всасываются в ЖКТ щелочные элементы. Щелочноземельные элементы меньше резорбируются, так как в кишечнике они переходят в слаборастворимую форму, соединяясь с присутствующими там фосфатами и жирными кислотами. Трансурановые и редкоземельные элементы в кишечнике образуют труднорастворимые соединения, поэтому степень всасывания их очень низкая.

Из физиологических особенностей организма, влияющих на величину всасывания продуктов деления в первую очередь влияет возраст - у молодых процент резорбции всегда выше, чем у старых. Всосавшиеся в кровь радиоактивные изотопы участвуют в обмене веществ так же, как и стабильные изотопы данного элемента.

В организм поступает только некоторая часть попавших ЖКТ радионуклидов, большая часть их проходит «транзитом» и выводится из кишечника. Во время прохождения в пищеварительном тракте происходит облучение кишечника, причем короткопробежные  $\alpha$ - и  $\beta$ - частицы облучают его стенку,  $\gamma$ - кванты достигают и другие внутренние органы, расположенные в брюшной полости грудной клетке.

Менее изучен путь поступления радиоактивных веществ в организм через кожу, которая считается эффективным барьером. Но в дальнейшем было установлено, что радиоактивные вещества, в составе жидких и газообразных соединений проникают через кожу животных и человека достаточно быстро. Так, скорость проникновения в организм человека паров оксида трития, и газообразного йода практически идентична со скоростью проникновения их через дыхательные пути, а количество плутония попадающего через кожу не меньше, чем при поступлении через ЖКТ. При приеме радоновых ванн в течение 20 мин. В организм через кожный барьер проникает до 4 % радона.

*Распределение радионуклидов в организме.* Независимо от путей поступления и источников поступления радионуклидов, их всасывание в организме следует рассматривать как звено, которое связывает содержание радионуклидов в окружающей или производственной среде с распространением и накоплением их в различных органах и тканях. А сам процесс всасывания является физиологическим процессом перехода различных веществ через мембраны клеток из внешней среды в организм.

Распределение всосавшихся радионуклидов определяется их физическими свойствами и химической природы – положением элементов в периодической системе, валентной формой радиоизотопа, растворимостью химического соединения, способностью образовывать коллоидные соединения в крови и тканях и другими факторами.



По типу распределения радиоактивных элементов в организме их разделяют (по Ю. И. Москалеву) на следующие основные группы: равномерный тип, скелетный (остеотропный), печеночный, почечный и щитовидный (табл. 10).

Такое деление условно, так как тип распределения в некоторых случаях может меняться.

Таблица 10

Типы распределения радионуклидов в организме

Тип распределения	Радионуклиды
Равномерный	водород, литий, натрий, калий, рубидий, цезий, рутений, фосфор хлор. бром и др.
Скелетный (остеотропный)	бериллий, кальций, стронций, барий, радий, цирконий, иттрий, фтор и др.
Печеночный	лантан, церий, прометий, плутоний, торий, марганец и др.
Почечный	висмут, сурьма, мышьяк, уран, селен и др.
Щитовидный	изотопы йода, астатин, бром.

Орган, в котором происходит избирательная концентрация радионуклида и вследствие чего он подвергается наибольшему облучению и поражению, называется *критическим*. В критическом органе концентрация тропного для него радионуклида устойчиво и резко преобладает над таковой в некритических органах.

Если же радионуклид проходит транзитом и не резорбируется в желудочно-кишечном тракте, то последний сам становится для такого нуклида критическим органом. При этом внутреннему облучению подвергаются стенки желудочно-кишечного тракта на всем его протяжении, и такое облучение прекращается лишь с выведением радионуклида из кишечника.

При поступлении нерастворимых соединений радионуклидов через органы дыхания, пищеварения и кожу критическими органами соответственно являются легкие, желудочно-кишечный тракт и кожа. Для некоторых радионуклидов критическими всегда являются одни и те же органы. Например, для йода - щитовидная железа, стронция, кальция и радия - кости.

Для всех радионуклидов критическими органами будут кроветворная система и половые железы, как наиболее радиочувствительные.

*Период полураспада и скорость выведения радиоактивных веществ из организма.*

Период полураспада является важной характеристикой биологической активности радионуклида при его инкорпорации. Наибольшую опасность для млекопитающих представляют изотопы, имеющие период полураспада от нескольких дней до нескольких лет. Данный факт объясняется тем, что при коротком периоде полураспада, измеряемом долями секунд или минут, основная масса радионуклида распадается, не создав опасную концентрацию в органах и тканях организма. Примером могут являться такие изотопы, как  $^{212}\text{Po}$  или  $^{220}\text{Ra}$ , период полураспада которых, составляет  $3 \cdot 10^{-7}$  с. Это можно сказать и об изотопах йода-134, 136-140, являющихся продуктами деления тяжелых ядер, период полураспада их равен нескольким секундам – минутам.

Радионуклиды с большим периодом полураспада (десятки тысяч лет и более) в естественных условиях также не смогут создать эффективной дозы, которая привела бы к развитию лучевого заболевания. Например,  $^{238}\text{U}$  имеет период полураспада  $4,5 \cdot 10^9$  лет, и содержание в земной коре его находится 0,0001 %, а в организме еще меньше, то получается, что в естественных условиях он не вызовет лучевого поражения. Однако действие коротко и долгоживущих радионуклидов может провоцироваться их дочерними продуктами распада.

После перехода растворимых соединений радионуклидов из желудочно-кишечного тракта в состав циркулирующих в организме жидкостей судьба их зависит от действия совокупности различных физиологических процессов.

В результате радионуклиды могут быть выведены из организма через кишечник, кожу, молочную железу, с новорожденным плодом, и другими путями.

Период, в течение которого из организма выводится половина поступившего количества радионуклида, называется биологическим периодом полувыведения ( $T_{\text{биол}}$ ).

Убыль радионуклидов из организма ускоряется за счет их радиоактивного распада. Следовательно, уменьшение радиоизотопов в организме происходит по биологическим закономерностям и по закону радиоактивного распада. Фактическую убыль их в организме принято выражать эффективным периодом полувыведения ( $T_{\text{эфф}}$ ):

$$T_{\text{эфф}} = \frac{T_{\text{физ}} \times T_{\text{биол}}}{T_{\text{физ}} + T_{\text{биол}}},$$

где  $T_{\text{физ}}$  - период полураспада радионуклида;

$T_{\text{биол}}$  - период его биологического полувыведения.

Для долгоживущих радионуклидов эффективный период полувыведения определяется его биологическим периодом полувыведения, а для короткоживущих, как правило, скоростью их физического распада.

Эффективный период полувыведения зависит от функционального состояния организма, вида и возраста организма, особенностей поступления, распределения радионуклида в организме и ряда других факторов.

Различия в эффективном периоде полувыведения радионуклидов из разных органов определяются выраженными индивидуальными особенностями поведения их в этих тканях и видовыми особенностями животных.

Например, цезий выводится из организма быстрее, чем стронций, а йод - быстрее, чем цезий. Наиболее быстро из организма удаляются радионуклиды, накапливающиеся (депонирующиеся) в мягких тканях (йод, рутений, теллур, цезий и др.). Длительное время, практически до бесконечности, задерживаются в организме остеотропные радионуклиды (стронций, иттрий, барий, радий и др.). Периоды полувыведения – благородных газов (криптон, ксенон, радон, торон) составляют нескольких часов, а  $T_{эфф}$  для трансурановых из костной ткани крыс составляет 1300 – 1500 сут., собак 16 –17 лет, человека 140 – 200 лет, т.е. практически больше удвоенной продолжительности жизни.

*Лучевая болезнь при внутреннем облучении.* В зависимости от поступившего в организм количества радионуклидов развивается острая, подострая и хроническая лучевая болезнь.

В чрезвычайных обстоятельствах военного времени, а также в аварийных случаях в результате взрыва ядерного устройства может возникнуть поражение попавшими в организм продуктами ядерного деления, которые представляют собой смеси более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов средней части (от Zn до Gd) периодической системы Менделеева. Поступая в организм, они в процессе обмена заменяют стабильные элементы и при распаде образуют нуклиды соседних групп периодической системы.

В клинике острой формы лучевой болезни при внутреннем поступлении продуктов ядерного взрыва выделяют три периода:

*первый - скрытый период;*

*второй - период разгара болезни;*

*третий - период разрешения болезни.*

Различают легкую, среднюю, тяжелую и крайне тяжелую степени тяжести лучевой болезни, обусловленных количеством поступивших в организм радионуклидов.

При *легкой* степени поражения периоды в развитии болезни разграничить не удается.

*Средняя* степень поражения характеризуется тем, что скрытый период длится в течение 3-5 дней, а период разгара - 1,5-2 недели. Тяжелого состояния у животных обычно не наблюдается.

При *тяжелом* поражении скрытый период длится в течение 3 -5 суток; период разгара болезни 2-4 недели, а иногда 1,5-2 месяца и более. Период разгара при тяжелой степени поражения постепенно переходит в период разрешения, который продолжается от 3 - 4 недель до 2 - 2,5 месяцев и заканчивается в большинстве случаев переходом в хроническую форму.

При *крайне тяжелой* степени поражения все симптомы болезни особенно резко выражены. У животных сравнительно быстро развивается кахексия, а через 2-3 месяца после поступления радионуклидов внутрь организма наступает смерть.

Указанные клинические периоды неодинаково проявляются при попадании радионуклидов внутрь организма через пищеварительный тракт и органы дыхания. При пероральном поражении преобладают признаки нарушения функции желудочно-кишечного тракта, а при ингаляционном - органов дыхания (ринит, трахеит, бронхит).

В целом следует отметить следующие особенности клиники острого поражения при внутреннем поступлении радионуклидов:

- отсутствие первичной общей реакции;
- отсутствие явлений подавления кроветворения;
- отсутствие геморрагического синдрома;
- отсутствие эпиляции (выпадения волос);
- резкое расстройство функции желудочно-кишечного тракта (потеря аппетита, рвота, понос с последующим развитием язвенно-некротического гастроэнтероколита);
- значительное раздражение ретикулоэндотелиальной системы и активация костномозгового кроветворения в течение первых 4 суток (лейкоцитоз, моноцитоз, гиперрегенеративный сдвиг в лейкограмме влево и др.), который затем сменяется глубокой лейкопенией и лимфопенией при значительном увеличении (в 4 раза) моноцитов;
- преобладающее поражение "критических" органов.

При подострой форме лучевого поражения периодизация и симптоматика сходна с таковой при остром поражении, но более растянута по времени и менее выражена.

Хроническая форма болезни была рассмотрена выше.

Раннюю *диагностику* лучевых поражений радионуклидами и прогнозирование степени их тяжести осуществляют на основании данных радиационной обстановки в месте, результатов контроля радиационного заражения, клинического осмотра и гематологических исследований. При необходимости измеряют радиоактивность и выделений (кала, мочи).

### **Отдаленные последствия облучения**

Под отдаленными последствиями облучения понимают различные патологические состояния организма, возникающие через определенное время после облучения (у мышей и крыс через несколько месяцев, у человека - через 10 - 20 лет и более).

К отдаленным последствиям облучения относят развитие катаракты (помутнение хрусталика), нефросклероз (поражение почек), дисгормональные состояния, возникновение злокачественных новообразований, сокращение продолжительности жизни.

Отдаленные последствия облучения часто отождествляют с изменениями, происходящими при естественном старении организма, поскольку они проявляются сходным образом. Это возникновение злокачественных опухолей, катаракт, склероза сосудов, ослабление эластических свойств кожи. Так как в результате облучения продолжительность жизни сокращается, а указанные изменения наступают в более раннем возрасте, говорят об ускоренном радиационном старении организма. Однако экспериментальные данные указывают на то, что сокращение продолжительности жизни в результате облучения и естественное старение не идентичны.

*Радиационная катаракта* является одним из наиболее типичных проявлений отдаленных последствий облучения, возникает при общем облучении организма или местном облучении области глаза.

Деление клеток хрусталика происходит в течение всей жизни человека, поэтому его можно рассматривать как постоянно обновляющуюся ткань. Однако он не имеет кровоснабжения и не обладает механизмом удаления клеток, так что пораженные ионизирующим излучением волокна не удаляются из хрусталика, а движутся к заднему полюсу и, будучи непрозрачными, приводят к его помутнению.

Пострадиационное развитие катаракты – явление пороговое. Пороговая доза для возникновения катаракты при однократном облучении рентгеновскими лучами глаза человека — 2 Гр, при фракционном облучении в период от 3 недель до 3 месяцев – 4-5 Гр.

*Нефросклероз.* Развивается в результате повреждения почечной ткани и сосудов почек. В обычных условиях почка характеризуется незначительной пролиферацией

клеток, и влияние облучения на нее, за исключением высоких доз, проявляется поздно. В почках человека и животных, подвергшихся облучению, происходят морфологические изменения: атрофия эпителия почечных канальцев, увеличение объема соединительной ткани, фиброз, сужение просвета сосудов, дегенерация и некроз почечных клубочков. Пороговые дозы повреждения почек практически одинаковы для разных животных и составляют 5—12 Гр. При фракционном облучении пороговые дозы могут возрасти, на три порядка.

*Злокачественные новообразования.* Одним из наиболее серьезных отдаленных последствий радиационного воздействия является возникновение злокачественных опухолей. Под влиянием облучения новообразования могут возникать практически во всех органах и тканях организма. Но наиболее частым следует считать злокачественные опухоли кожи и костей, эндокринные опухоли (рак молочной железы и яичников) и лейкозы.

По предложению Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКАДР) для определения риска возникновения различных злокачественных новообразований используется величина, определяемая число случаев на миллион человек на 1 рад (0,01 Гр). Расчет этой величины проводится по данным, полученным при дозах в 100 и более раз превышающих 1 рад, исходя из гипотезы линейности и беспороговости. Наиболее полная информация о возникновении у человека лейкозов и опухолей, вызванных облучением, содержится в материалах НКДАР ООН об исследовании людей, переживших атомную бомбардировку в Хиросиме и Нагасаки, а также наблюдении больных после локального облучения с терапевтическими целями и людей, облученных в результате профессиональной деятельности.

В связи с увеличением в последние годы риском возникновения опухолей, в результате радиационного воздействия, особую актуальность приобретает вопрос нормирования допустимых доз ионизирующего излучения. Согласно концепции нормирования канцерогенов, допустимая доза канцерогена – это доза, не способная вызвать повреждающий эффект, который может обнаруживаться существующими методами исследований. Суммарный естественный канцерогенный риск для всех органов к настоящему времени можно оценить для человека величиной около  $20 \cdot 10^{-6}$  случаев в год (с ошибкой  $0,4 \cdot 10^{-6}$  случаев в год). Для риска за всю продолжительность жизни человека эта ошибка составляет  $4 \cdot 10^{-3}$ . Следовательно, канцерогенный эффект от дозы, вызывающий риск 0,4% за всю продолжительность жизни не будет выявлен никакими методами исследования. Такая доза может рассматриваться как «практический порог».

Другой путь в обосновании нормирования канцерогенов заключается в использовании концепции «выведения рака за пределы наибольшей продолжительности жизни». Он основан на определении такой малой дозы фактора, вызывающего канцерогенез, когда величина латентного периода становится больше продолжительности жизни. Экспериментально показано, что продолжительность латентного периода возрастает с уменьшением дозы и стремится к определенной постоянной величине, часто не превышающей продолжительность жизни.

В настоящее время не существует однозначных доказательств наличия или отсутствия порога в канцерогенном действии ионизирующего излучения. В этих условиях наиболее обоснованным является принятие концепции беспороговости как наиболее осторожной и щадящей. Линейная беспороговая гипотеза канцерогенного действия радиации для целей нормирования требует установления социально приемлемого уровня риска. Безопасной считается такая доза ионизирующего излучения, которая способна вызывать опухоли с частотой  $1 \cdot 10^{-6}$ .

*Сокращение продолжительности жизни.* Радиационные изменения, уменьшающие резервные возможности организма, являются началом биологической «цепной реакции», которая, преждевременно исчерпав его адаптационные возможности, может в конечном итоге привести к сокращению продолжительности жизни облученного организма.

Изменение продолжительности жизни неодинаково при разных способах облучения. Фракционное облучение вызывает меньшее сокращение продолжительности жизни по сравнению с однократным облучением в аналогичной дозе той же мощности. Хроническое облучение также сопровождается снижением продолжительности жизни, однако при низкой мощности дозы этого эффекта не отмечается, а при облучении в малых дозах продолжительность жизни может увеличиваться.

Экспериментально доказано, что радиационное сокращение продолжительности жизни имеет пороговый характер. Пороговая доза для млекопитающих составляет 0,4 Гр при остром облучении и 5 - 10 сГр/год при хроническом облучении в дозах небольшой мощности. Прямые данные о продолжительности жизни человека после острого облучения ограничиваются единичными результатами наблюдений за пережившими аварии на атомных производствах. Н. Г. Даренская, экстраполируя данные, полученные различными авторами на млекопитающих, пришла к заключению, что у человека на каждые 0,01 Гр сокращение продолжительности жизни составит при однократном облучении 1 – 15 сут., а при хроническом воздействии – 0,08 сут.

*Неопухолевые формы последствий.* Включают три вида патологических процессов: гипопластические состояния, склеротические процессы и дисгормональные состояния.

*Гипопластические состояния* развиваются в кроветворной ткани, слизистых оболочках органов пищеварения, дыхательных путей, в коже и других органах. Они проявляются лейкопенией, гипо- и гиперхромной анемией, атрофией слизистой оболочки желудка кишечника, гастритом, атрофией половых желез и бесплодием.

*Склеротические процессы* характеризуются обширными и ранними повреждениями сосудистой сети облученных органов, развитием очаговых или диффузных разрастаний соединительной ткани на месте погибших паренхиматозных клеток. Морфологически регистрируются: цирроз печени, нефросклероз, лучевые катаракты, некрозы костной ткани, поражения нервной системы и другие изменения.

*Дисгормональные состояния* чаще проявляются в форме ожирения и реже - истощения, в виде гипотизарной кахексии и несахарного мочеизнурения. Могут развиваться кистозные изменения яичников, нарушения секреторной и гормональной функций, приводящих к патологическим сдвигам в половых циклах, к стойкой гиперплазии слизистой матки, паренхимы молочных желез, что может привести к развитию опухолей.

К числу дисгормональных состояний относятся также поражения щитовидной (гипотиреозидизм) и поджелудочной (сахарный диабет) желез.

*Механизм отдаленных последствий.* В механизме отдаленных последствий облучения на клеточном уровне лежат три типа первичных нарушений, возникающих в результате непосредственного действия ионизирующего излучения.

Первый - гибель клеток, которая влечет за собой невосполнимую утрату некоторой части или всех элементов какой-либо клеточной разновидности, например, изменения в гонадах при лучевой кастрации.

Второй тип стойких нарушений - длительное сохранение (консервация) ненаследственных изменений в облученных клетках. Такие нарушения характерны для тканей с низким уровнем физиологической регенерации, таких как нервная система, эндокринные железы, соединительная ткань и т.д.

Третий тип первичных изменений - нелетальные наследственные нарушения (мутации). Они, как правило, затрагивают лишь один из гомологичных локусов (место расположения того или иного гена в хромосоме) парных хромосом, составляющих геном облученных клеток, т. е. находятся в гетерозиготном состоянии. Такие нарушения стойко репродуцируются при размножении соматических клеток. Решающее значение они имеют



в тканях с быстро обновляющимися клеточным составом, так как, возникнув на уровне стволовых клеток, они могут неопределенно долго воспроизводиться.

Надо иметь в виду, что отдаленные последствия облучения могут быть различными в зависимости от характера клеточной популяции. В быстро обновляющихся клеточных системах существует мощный механизм восстановления (репарации) повреждений благодаря удалению в процессе размножения клеток с хромосомными aberrациями. В тканях же с медленно обновляющимся клеточным составом после облучения концентрация клеток с генетическими нарушениями со временем не уменьшается, а непрерывно нарастает вследствие накопления мутационных изменений, как спонтанных, так и вызванных искусственно. Следовательно, в тканях с медленно обновляющимся клеточным составом необратимые последствия лучевого поражения, проявляющиеся и в отдаленные сроки, выражены значительно полнее, чем в популяциях с высоким темпом клеточного обновления.

Поскольку биологическая система представляет собой единое целое, первичные нарушения становятся причиной развития вторичных изменений, непосредственно не связанных с лучевым воздействием, большая часть которых носит компенсаторный характер. Возмещение функции происходит за счет жизнеспособных элементов поврежденных тканей и органов. К ним относятся, прежде всего, гиперпластические явления (гиперплазия - увеличение числа клеток вследствие их избыточного новообразования). Они могут быть обусловлены, во-первых, сокращением продолжительности жизненного цикла клеточных элементов (в частности, гиперплазия костного мозга, возникающая в поздние сроки после облучения), во-вторых, функциональной неполноценностью клеток (разрастание строматических элементов облученного яичника, которые перестают образовывать обычные гормоны).

В состоянии длительного компенсаторного напряжения, развивающегося в организме, перенесшем острую или хроническую лучевую болезнь, действие дополнительных внешних или внутренних факторов может исчерпать резервные возможности организма (атрофия облученной щитовидной железы после частичной тиреоидэктомии, а также развитие тяжелой аплазии кроветворных органов у облученных обезьян под влиянием инфекции).

### **Принципы лечения лучевой болезни**

Лечение острой лучевой болезни базируется на двух принципах. Первый - *патогенетическая терапия*, которая основывается на предотвращении и устранении глубокой патологии в критических органах, например система кроветворения. Второй –

*симптоматическая терапия*, которая учитывает нарушения, возникающие в некритических системах организма.

К патогенетической терапии следует отнести заместительную терапию: трансплантация костного мозга и замещение периферической крови в целях восполнения клеточных потерь в системе кроветворения. Целью заместительной терапии является ослабление нарушений, непосредственно угрожающих жизни. К таким нарушениям относят аплазию костного мозга и связанное с ней обеднение периферической крови форменными элементами крови, а также инфекционные осложнения и кровоточивость.

Однако следует иметь ввиду, что трансплатация костного мозга может быть необходима только для пострадавших категории «выживание возможно» и редко для категории «выживание вероятно», когда имеется основание спонтанного восстановления. Показания для трансплантации костного мозга пострадавшим категории «выживание несомненно», вообще отсутствуют, а для категории «выживание невозможно» - она бесполезна.

Симптоматическое лечение при острой лучевой болезни направлено на поддержание и улучшение деятельности всех органов и систем организма. По мере развития болезни возникает необходимость в применении самых различных средств. В комплекс лекарственных препаратов при симптоматической терапии входят средства:

- нормализующие функцию центральной нервной системы (транквилизаторы);
- препараты, десенсибилизирующего действия (димедрол, супрастин, тавегил и т. п.);
- средства ослабляющие кровоточивость (глюканат кальция, хлористый кальций, витамины С, Р, К);
- препараты стимулирующие гемопоэз (витамин В<sub>12</sub>, нуклеианат натрия, фолиевая кислота, лейкоген и т. п.);
- средства, оказывающие антитоксическое действие (глюкоза с аскорбиновой кислотой, тиосульфат натрия и т. п.);
- противомикробные препараты (антибиотики).

Симптоматическое лечение проводится в соответствии с тяжестью и периодом течения болезни, а также с учетом общего состояния больного. Также необходимы мероприятия по уходу, содержанию и режиму питания пострадавших.

Профилактика и лечение хронической лучевой болезни основана на строгом, соблюдении нормативов и правил работы с радиоактивными источниками, перевод в условия, соответствующие нормативным, или полное прекращение профессионального

контакта с радиацией. В зависимости от глубины последствий хронической болезни применение симптоматической терапии.

Лечебные мероприятия, при инкорпорации радионуклидов в организме основаны на максимально раннем применении методов и средств, направленных на снижение всасывания радионуклидов и ускоренного выведения их из организма.

При попадании радионуклидов в органы дыхания применяют отхаркивающие средства. При поступлении их в ЖКТ назначают промывание желудка, солевые слабительные, а в последующем клизмы. В целях уменьшения резорбции и ускоренного выведения радионуклидов из организма применяются различные сорбенты – сульфат магния, цитрат натрия, трикалийфосфат, целлюлозу этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА) препараты – адсорбар, полисурьмин, ферроцин, и др. Указанные препараты, соединяясь с радионуклидами, образуют устойчивые нерастворимые комплексы, которые быстро удаляются из организма. Кроме того, медицинские мероприятия должны быть направлены на замену радионуклидов стабильными изотопами на всех этапах их метаболизма: в процессе транспорта по кровеносной системе, в органах и тканях, а также на этапе выведения их из организма через почки и пищеварительный тракт. К числу таких мер можно отнести применение стабильного йода в виде KI или других йодсодержащих препаратов с целью ускорения выведения и декорпорации  $^{131}\text{I}$  – одного из биологически значимых искусственных радионуклидов.

Наряду с указанными лечебными мерами при наличии признаков лучевого поражения применяют симптоматическое лечение.

### **Действие малых доз радиации**

Исследования в области влияния малых доз радиации на животные и растительные организмы в последние десятилетия являются наиболее актуальными и даже доминирующими в радиационной биологии, особенно в связи с интересом связанным с радиоэкологическими проблемами. Оценка эффектов малых доз на организмы у исследователей неоднозначна и носит порой дискуссионный характер. В этой главе мы попытаемся отразить различные подходы к данной проблеме, сложившиеся в радиобиологии.

Понятие «малые дозы» не имеет единого определения. Принято считать, что малые дозы это все дозы менее 1 Гр. В соответствии с другим подходом малые дозы это дозы, равные естественному фоновому облучению или в 10 - 100 его превышающие. Или это дозовые пределы для профессиональных работников, не оказывающие непосредственного влияния на состояния их здоровья. Существует мнение, малым дозам следует относить

дозы, которые в 100 раз меньше  $LD_{50/30}$ . Следует иметь в виду, что физические величины диапазона малых доз для разных организмов в зависимости от радиочувствительности могут сильно различаться даже на несколько порядков.

Выше рассматривались эффекты доз, которые приводили к инактивации молекул, гибели клеток и значительным проявлениям лучевого поражения. Можно было бы просто решить проблему способом линейной экстраполяцией от больших доз к малым (до величин естественного радиационного фона) и тем самым свести механизм их действия к количественному снижению проявления радиобиологических эффектов. И на самом деле в радиобиологии долгое время существовало мнение, что большие дозы облучения вызывают большие повреждения, а малые меньшие. Однако это далеко не так. Исследования биологического действия малых доз выявило, наличие качественно иных радиобиологических эффектов, которые не свойственны лучевым поражениям в больших дозах.

*Влияние доз от естественного радиационного фона.* Долгое время оставалось не изученным, какое значение для жизни на нашей планете имеет постоянное действие излучений на уровне сверхмалых доз естественного радиационного фона 10 - 15 мкР/час или облучения 1 мЗв/год. Экстраполируя действие от больших доз к фоновым, строились предположения, что естественный радиационный фон наносит наименьший вред организму, поскольку и так злокачественные новообразования, наследственные и другие болезни проявляются без дополнительного облучения.

Для выяснения биологического значения ЕРФ первые эксперименты были поставлены в 1965 г. Х. Планелем. Изучая скорость размножения парameций при экранировании их от ЕРФ свинцом), он обнаружил, что снижение фона природной радиации приводит не к улучшению, а наоборот, к ухудшению развития клеточных культур и замедлению скорости деления клеток.

В дальнейшем, появились новые работы Х. Планеля, а также А. М. Кузина, А. А. Козлова, Т. Д. Люкки и др., показавших, что снижение внешнего ЕРФ (космического и Земного) замедляет скорость деления одиночных клеток (простейших, водорослей, культуры клеток), эмбриональное развитие насекомых, рост и развитие растений и животных. Затем были использованы подземные термостатируемые железобетонные камеры - бункеры. Радиобиологические исследования в таких бункерах подтвердили выводы о положительной роли ЕРФ в жизнедеятельности организмов.

Внесение в камеры солей урана, излучение которого восстанавливало ЕРФ, при сохранении всех других условий полностью снимало эффект угнетения развития организмов.

Однако при одном только экранировании организмов от действия внешнего ЕРФ наблюдалось все же незначительное снижение жизнеспособности организмов (в 1,2 - 1,5 раз), поскольку при такой постановке экспериментов оставалось еще внутреннее облучение, главным образом, за счет эндогенного радионуклида  $^{40}\text{K}$ . И только в 80 - 90 годах начали проводить эксперименты на высших растениях и животных с использованием их экранирования в сочетании с удалением радона из воздуха и заменой в организме радиоактивного калия, поступающего с пищей, на стабильный. При такой защите организмов от внешнего и внутреннего ЕРФ мощность природного облучения резко падала, и происходило значительное, более чем вдвое, угнетение жизненных процессов.

В своих монографиях А. М. Кузин, в которых был обобщен большой фактический материал собственных исследований и мировой литературы, сформулировал идею о роли ЕРФ для жизнедеятельности живых организмов. Автор пришел к выводу, что ЕРФ не только не вреден для биоты, а необходим для ее существования на нашей планете.

Открытие жизненно важной необходимости непрерывного облучения организмов от источников природной ионизирующей радиации в ультрамалых дозах поставило перед радиобиологами задачу выяснения биофизического механизма этой зависимости.

*Радиационный гормезис.* В конце XIX века стало известно, что ряд химических соединений оказывает стимулирующий эффект на рост и развитие микроорганизмов, грибов, водорослей, растений. Впоследствии это явление было обнаружено на самых разнообразных биологических объектах. Термин «гормезис» впервые появился в научных публикациях в 1942 г. при описании стимуляции клеточного деления и роста грибка под влиянием антибиотика в малых концентрациях, тогда как в больших концентрациях антибиотик оказывал угнетающее действие. Таким образом, *гормезис — это неспецифический эффект воздействий на живые организмы в малых дозах (концентрациях), вызывающих изменения, диаметрально противоположные повреждающим эффектам при воздействии в больших дозах.*

Вскоре после открытия ионизирующего излучения Рентгеном стали появляться отдельные сообщения, в которых наряду с поражающим действием больших доз радиации иногда обнаруживались и стимулирующие эффекты при облучении биологических объектов в малых дозах. Однако эти сообщения были немногочисленны, и

основное внимание радиобиологических работ было приковано к поражающему действию ионизирующих излучений. В 1980 г. вышла монография Т. Д. Люкки, в которой автор обобщил данные литературы и привел собственные эксперименты о биологическом эффекте ионизирующих излучений в малых дозах, которые в отличие от воздействия в больших, повреждающих дозах оказывают диаметрально противоположное, «благоприятное», стимулирующее действие на рост, развитие и жизнедеятельность клеток и многоклеточных организмов. Такие ответные реакции на облучение в малых дозах были объединены автором под названием *«радиационный гормезис»*.

Стало очевидным, что гормезисные эффекты, производимые радиацией в малых дозах, характеризуются теми же свойствами и теми же характеристическими параметрами, что и при химическом гормезисе. Это является еще одним доказательством проявления неспецифической защитной реакции организмов и клеток на лучевые воздействия. Реальность радиационного гормезиса нашла подтверждение в многочисленных исследованиях, результаты которых показали, что облучение в малых дозах вызывает неспецифический ответ, а одно из проявлений его - *гормезис* — *аналогичен стадии адаптации стрессовой реакции*.

Проявления гормезиса приведены в табл. № 11, составленной А. М. Кузиным (1989) с дополнениями Ю. Б. Кудряшова.

Таблица 11  
Биологических эффекты действия ионизирующих излучений в больших и малых дозах

Объект обследования	Критерий действия радиации	Результат действия в дозах	
		больших	малых, вызывающий гормезис
Парамеции, фито и зоопланктон, дрожжи, клетки в культуре	Скорости деления клеток, роста популяции, синтеза ДНК	Понижение, вплоть до полного прекращения процесса	Возрастание
Семена, растения	Всхожесть семян, рост, развитие растений	Задержка, прекращение	Стимуляция
Эмбрионы насекомых и птиц	Рост и развитие	Задержка, прекращение	Стимуляция
Насекомые, птицы, рыбы, млекопитающие	Плодовитость	падение	Возрастание
Животные, человек	иммунитет	угнетение	активация

Из таблицы видно, что эффект гормезиса обнаруживается на разных уровнях биологической организации и проявляется процессами, противоположными наблюдаемым в больших дозах.

Абсолютные величины малых доз для разных биологических объектов из-за различий в видовой радиочувствительности значительно отличаются. Область малых доз, вызывающих гормезис, по расчетам А. М. Кузина, находится ниже на один-два порядка при внешнем общем однократном облучении полулетальных доз ( $LD_{50}$ ). Например, для человека и некоторых млекопитающих  $LD_{50}$  составляет 4-5 Гр. Поэтому для них дозы от 0,4-0,5 Гр и ниже могут быть отнесены к малым. Полулетальные дозы для многих семян растений находятся в диапазоне 200-500 Гр. Следовательно, для них область малых доз будет характеризоваться более высокими величинами – 2-5 Гр.

*Эффект Петко.* Хорошо известно, что характер и интенсивность радиобиологических ответов организмов на действие ионизирующих излучений зависят не только от величины, но и от мощности дозы облучения. Для больших доз излучения характерна прямая зависимость лучевого поражения от мощности дозы. Увеличение мощности («скорости получения») дозы излучения на два-три порядка вызывает возрастание поражающего эффекта более чем в три раза.

Иная картина зависимости радиобиологических эффектов от мощности дозы наблюдается при облучении в нелетальных, малых дозах, когда растянутая во времени доза хронического облучения может оказывать более сильный эффект по сравнению с той же дозой, полученной при кратковременной лучевой экспозиции большей мощности.

Впервые такой эффект на уровне клеточной мембраны обнаружил в 1972 г. канадский ученый А. Петко, который показал, что длительное облучение клеток вызывает значительно большее изменение проницаемости биологических мембран, (БМ), чем кратковременное в той же дозе. Так, при кратковременном действии рентгеновского излучения большой мощности (26 рад/мин) на клетку проницаемость БМ изменялась при высокой поглощенной дозе облучения - 3,5 крад. Но при длительном облучении клетки ( $^{22}\text{Na}$  в физиологическом растворе) в дозе малой мощности (0,001 рад/мин) для изменения проницаемости мембраны для Na было достаточно поглощенной дозы 0,7 рад. Таким образом, для проявления радиобиологического эффекта при длительном действии маломощного излучения оказалась достаточной доза, в 5 тысяч раз меньшая, чем при облучении с высокой мощностью дозы. Этот феномен обратной зависимости от мощности дозы при облучении клеток в незначительной по величине дозе и их

гиперрадиочувствительности по некоторым критериям при облучении в сверхмалых дозах получил впоследствии название «*эффект Петко*» (Р. Грейб, 1996).

Таким образом, биологические реакции на изменение мощности дозы радиации могут служить показателем различий в механизмах биологического действия ионизирующих излучений в больших и малых дозах.

*Радиоадаптивный ответ.* Это реакция биологических объектов, которая заключается в том, что после действия излучения в малых, адаптирующих дозах  $D_1$  при повторном облучении через определенный интервал времени в больших, проявляющих дозах  $D_2$  радиобиологический эффект от дозы  $D_2$  понижается, иными словами, облучение в малой дозе в определенном интервале доз способно вызывать состояние повышенной радиоустойчивости.

Особенностью радиоадаптивного ответа обычно являются многократные различия в величинах адаптирующей  $D_1$  и проявляющей  $D_2$  доз облучения, а также фиксированные интервалы времени между двумя экспозициями (например, для мышей и крыс - две недели, а для клеток млекопитающих - 4-6 часов).

Эти параметры подвержены колебаниям в зависимости от объекта исследований, условий облучения и выбранного радиобиологического теста.

Обязательное соблюдение интервала времени между облучениями в дозах  $D_1$  и  $D_2$  указывает на то, что программа переключения клеток на адаптивный ответ требует сравнительно продолжительной перестройки радиорезистентности, которая может сохраняться в течение многих клеточных циклов. Так, если экспозиция адаптивного ответа на клеточном уровне обычно требует 4-6 часов, то сохраняться ответ может несколько часов, суток, месяцев.

Последний феномен позволяет говорить о двух возможных способах реализации адаптирующих воздействий:

- включение новой генетической программы;
- индуцированные радиацией синтез белков и мобилизация антиокислителей, т. е. эндогенных защитных ресурсов клетки, в количествах, способных поддерживать состояние готовности к адаптивному ответу в течение нескольких клеточных поколений.

Так, было обнаружено, что через 4-6 часов после воздействия  $\gamma$ -излучения в адаптирующих дозах в лимфоцитах человека появляются вновь синтезированные белки, которые могут быть кандидатами на роль адаптивных белков. Известно также, что уже вскоре после действия ионизирующих излучений в адаптирующих дозах в клетке



происходит накопление антиокислителей-адаптогенов, выполняющих функцию противолучевых средств.

Радиоадаптивный ответ обнаружен при облучении растительных и животных организмов, а также в опытах на лимфоцитах человека, мыши и кролика, фибробластах китайского хомячка, клетках костного мозга и сперматозоитах мышей. При адаптивном ответе можно достичь 50-60% снижения количества генных, хромосомных мутаций или других нарушений генома, а также иных проявлений повреждения биологических объектов. Наиболее общим, интегральным критерием адаптивного ответа в опытах на животных является изменение их выживаемости после повторного, воздействия рентгеновского или  $\gamma$ -излучения.

В последнее время показано (А. Н. Котеров, И. В. Филиппович, 2002), что повышение радиорезистентности происходит не только после однократных  $D_1$ , но и после хронических, а также дробных лучевых воздействий, которые по суммарной величине адаптирующей дозы могут приближаться к соответствующим параметрам однократного облучения  $D_2$ . При этом интервалы времени между  $D_1$  и  $D_2$  могут значительно варьировать в зависимости от условий эксперимента.

Обнаружено также, что не только ионизирующие излучения в малых дозах, но и другие физические или химические воздействия низкой интенсивности способны отсрочено вызывать повышение устойчивости биологических объектов к последующему, более сильному, экстремальному действию, т. е. можно говорить о существовании более общего феномена адаптивного ответа.

Все это еще раз подтверждает вывод о неспецифическом, стрессовом характере эффектов действия малых доз ионизирующих излучений.

### **Вопросы и задания**

1. Острая лучевая болезнь
  2. Какие периоды выделяют в развитии острого течения лучевой болезни.
  3. Что понимают под внутренним облучением инкорпорированными радиоактивными веществами
  4. Какие особенности при внутреннем облучении
  5. Какими параметрами определяется биологический эффект от инкорпорированного действия радиоактивных веществ
  6. Какие отдаленные последствия от облучения
  7. Какие принципы лечения лучевой болезни
  8. Каково действие малых доз радиации
  9. В чем заключается «радиационный гормезис».
- Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение.

### **Список литературы**

1. *Кудряшев Ю.Б.* Радиационная биофизика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.-448с.
2. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
3. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
4. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. *Ильенко А.И., Кривоуцкий Д.А.* Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
6. *Кривоуцкий Д.А.* Радиоэкология сообществ наземных животных. М. Энергоатомиздат, 1983.- 96 с.
7. *Кривоуцкий Д.А.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Кривоуцкий Д. А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. М. Наука, 1988. - 240 с.
8. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
9. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.

### **Использованные информационные ресурсы**

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## Лекция 6.

### Радионуклиды в биосфере

**Аннотация.** В данной лекции рассматривается радиоактивность оболочек Земли, из чего складывается радиационный фон, источники загрязнения окружающей среды.

**Ключевые слова.** Радиоактивность, естественный радиационный фон, космическое излучение, ядерный взрыв, искусственные радионуклиды.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи и вопросы к лекции.

### Радиоактивность оболочек Земли

Под радиационным фоном (РФ) принято понимать ионизирующие излучения от природных источников космического и земного происхождения, а также от искусственных радионуклидов, рассеянных в биосфере в результате деятельности человека.

Радиационный фон воздействует на все население земного шара, имея относительно постоянный уровень. РФ не включает облучение лиц, работающих с источниками ионизирующего излучения и облучение людей в диагностических и лечебных целях и др.

Различают природный (естественный) радиационный фон, технологически измененный естественный радиационный фон, искусственный радиационный фон, обусловленный радиоактивностью продуктов ядерных взрывов, авариями на ядерных установках.

*Естественный радиационный фон (ЕРФ)* представляет собой ионизирующие излучения, действующие на человека на поверхности земли от космического излучения и природных источников земного происхождения, и нередко в литературе отождествляется с понятием РФ.

Естественный радиационный фон существует на протяжении всей истории Земли. Следовательно, естественная радиоактивность представляет собой фактор среды, в которой происходит как онтогенетическое, так и филогенетическое развитие организмов.

В. И. Вернадский, М. Кюри, несколько позднее А. И. Опарин и М. Кальвин считали, что энергетическими источниками жизни на Земле являются солнечный свет и ядерная энергия. В. А. Комаров также указывал, что ядерная энергия не могла не использоваться живыми организмами, ибо радиоактивность земной коры, как источник кинетической энергии, занимает одно из основных мест.

Естественную радиоактивность составляют космические лучи и радиоактивные элементы земной коры. Интенсивность космического излучения на земной поверхности непостоянна, она изменяется в зависимости от солнечной активности, высоты над уровнем моря, широты и климатических условий.

Количество естественных радиоизотопов колеблется в различных районах Земли. Например, высоким содержанием отличаются моноцитовые районы Бразилии в штатах Эспириту-Санту, Рио-де-Жанейро, районы Керала и Мадраса в Индии, некоторые острова Новой Зеландии, дельты рек Нила и Конго в Африке, сланцевые и песчаные районы Франции, Чехословакии и др.

С наличием радиоактивных элементов в природных образованиях связано существование поля ядерных излучений, которое постоянно воздействует на все живые существа биосферы.

Естественная радиоактивность постепенно уменьшается в силу распада многих радиоактивных элементов Земли, (интенсивность космического излучения остается относительно постоянной), поэтому в те времена, когда начали протекать процессы, приведшие к появлению жизни на Земле, радиоактивность была значительно выше.

Первые этапы развития жизни на Земле уходят вглубь доархеозойской эры. В эти периоды происходила химическая и биохимическая эволюция, приведшая к синтезу органических веществ и возникновению биохимических циклов. В результате отбора в процессе очень длительной химической и биохимической эволюции, при непрерывной изменчивости химической среды под действием свободных радикалов, возбужденных молекул и инициированных цепных реакций, образуемых при воздействии радиации, сформировались биохимические реакции, способные к самовоспроизведению системы белков и полинуклеотидов. На основании универсальности биохимических механизмов (адениловая система биоэнергетики, гликолитический тип распада углеводов, цикл лимонной кислоты, аэробное окисление веществ), установленных у бактерий, растений и животных, Л. Г. Пасынский пришел к выводу, что некоторые химические соединения, свойственные для высоких форм жизни, возникли на этой фазе эволюции.

С возникновением первичных форм жизни химическая и биохимическая эволюция уступила по интенсивности морфологическим и физиологическим формам эволюции. А. Л. Шабадаш, изучая сравнительную радиочувствительность различных по уровню развития организмов, показал, что более примитивной организации (например, бактерии, вирусы) свойственна повышенная радиостойчивость.

Биогеохимические исследования свидетельствуют, что в начальные этапы развития органического мира на Земле преобладали виды организмов, накапливающие радиоактивные элементы. Это может указывать на использование ядерной энергии древними организмами для обеспечения энергетических потребностей биосинтеза. К этому периоду (кембрийская эпоха) относят последовательное появление на Земле водорослей, грибов, мхов, папоротникообразных, голосемянных и покрытосемянных растений.

Из данных радиоэкологии следует, что уровень естественной радиоактивности отображает степень организации метаболических процессов живых объектов. С усложнением организмов, возникновением дифференциации и интеграции тканей радиоактивность их понижается, одновременно снижается и радиоустойчивость.

В образовании новых видов организмов большое значение имеет генетическое действие естественного радиоактивного фона. А. А. Сапегиным, Н. П. Дубининым, Мюллером и другими показано, что воздействие радиации на наследственные свойства не имеет порога. Изменение наследственных свойств возможно от единичного акта ионизации и с повышением дозы увеличивается. Поэтому предполагается, что мутагенные действия радиации в древние эпохи были более значительными. В настоящее время отмечено, что районы с повышенным радиоактивным фоном отличаются большим своеобразием растительных видов, например заповедник «Каменные могилы» на Украине (Д. М. Гродзенский).

Современные данные позволяют считать, что у живых организмов в силу их большой приспособляемости и пластичности возможна адаптация к повышению фонового излучения, которая вырабатывается при эволюционном отборе форм. В литературе описаны случаи возникновения радиоустойчивых форм микробов из рода *Pseudomonas*; они размножались после облучения их дозой 20 млн. рад, тогда как обычные популяции погибают при воздействии 1 - 3 млн. рад. Отсутствие выраженных изменений у растительных и животных организмов, включая и человека, в районах повышенного радиоактивного фона в 10 - 100 раз (штат Маин-Джераис в Бразилии, штат Керала в Индии, остров Ниуэ в Новой Зеландии и др.) дает основание говорить о возможности приспособления, адаптации живых организмов в течение ряда поколений к повышенным дозам ионизирующего излучения.

Таким образом, естественная радиоактивность как фактор внешней среды в развитии органического мира является одним из источников энергии, обеспечивающим филогенез растительных и животных организмов.

При определенных условиях результат облучения может быть стимулирующим, угнетающим и летальным. Стимулирующее действие ионизирующие излучения оказывают при облучении биологических объектов малыми дозами. Изучение действия малых доз ионизирующего облучения на живые объекты стало одной из центральных проблем радиобиологии. Это объясняется интенсивным развитием атомной энергетики и постоянно расширяющимся использованием искусственных радионуклидов в деятельности человека

Естественный радиационный фон является основным компонентом РФ. Его формируют внешние источники внеземного происхождения (космическое излучение); внешние источники земного происхождения (природная радиоактивность); т. е. радионуклиды, присутствующие в земной коре, воде, воздухе; внутренние источники - радионуклиды естественного происхождения, содержащиеся в организме человека.

*Космическое излучение.* Космические лучи представляют собой поток ядерных частиц, приходящих на земную поверхность с различных областей мирового пространства. Такие лучи называют первичным космическим излучением. Средняя энергия космических частиц составляет  $10^{10}$  эВ. В потоке частиц встречаются как частицы, имеющие значительно меньшие уровни энергии, так и частицы с энергией до  $10^{19}$  эВ. Первичное космическое излучение состоит из протонов (92%),  $\alpha$ -частиц (ядра гелия - 7%), ядер атомов лития, бериллия, углерода, азота, кислорода (0,78%) и ядер атомов, заряд которых более 10 (0,22%).

В настоящее время существует несколько гипотез, объясняющих происхождение космического излучения. По гипотезе Э. Ферми, заряженные частицы многократно ускоряются в межзвездном пространстве в блуждающих магнитных полях космической пыли. Широкое признание в астрономии получила гипотеза, разработанная И. С. Шкловским, согласно которой источником первичного космического излучения служат многочисленные туманности, рассеянные в галактике и возникшие в результате вспышек сверхновых звезд. Вклад в общий поток космических частиц, падающих на поверхность Земли, вносит и Солнце. При резком увеличении солнечной активности возможно увеличение интенсивности космического излучения на 4 - 100 %.

При падении космических частиц на поверхность Земли происходит их взаимодействие с атомами и молекулами атмосферы, вследствие этого возникает вторичное космическое излучение; при этом наиболее существенными процессами взаимодействия являются электронно-фотонные и электронно-ядерные. При электронно-фотонном процессе заряженные частицы, взаимодействуя с полем ядра атома, порождают фотоны, которые образуют пары электронов и позитронов. Эти частицы в свою очередь вызывают

возникновение новых фотонов. Процесс лавинообразного нарастания числа частиц и фотонов продолжается до тех пор, пока энергия их не становится достаточно малой и не растрачивается на ионизацию и возбуждение атомов и молекул воздуха.

Электронно-ядерный процесс обусловлен взаимодействием первичных космических частиц, энергия которых не менее  $3 \cdot 10^9$  эВ, с ядрами атомов воздушной среды. При этом одновременно возникает ряд новых частиц - протоны и нейтроны (осколки ядра) и  $\pi$ -мезоны трех типов: отрицательно заряженные, несущие положительный заряд и не имеющие заряда. Заряженные  $\pi$ -мезоны (их масса по отношению к массе электрона равна 273 единиц), распадаются (среднее время жизни  $2,5 \cdot 10^{-8}$  с) в более устойчивые  $\mu$ -мезоны (масса 207 единиц) и нейтрино; нейтральные  $\pi$ -мезоны ( $\tau = 2,5 \cdot 10^{-16}$  с) в свою очередь распадаются на 2 фотона, а  $\mu$ -мезоны - на электроны, позитроны и нейтрино. Вторичное космическое излучение, таким образом, очень сложно и состоит из всех известных в настоящее время элементарных частиц и излучений.

По мере приближения к поверхности Земли интенсивность первичного космического излучения снижается; интенсивность вторичного космического излучения достигает максимума на высоте 20 - 30 км. На уровне моря интенсивность первичного излучения составляет 0,05 % от первичной величины.

Следует отметить, что уровень космического излучения в определенной степени зависит от геомагнитной широты, возрастая от экватора к полюсам. Имеет место и барометрический эффект, сущность которого заключается в том, что повышение атмосферного давления приводит к уменьшению космического фона (0,35 % на 1 мм ртутного столба).

Для оценки биологического действия вторичное космическое излучение можно разделить по уровню энергии и составу частиц на 4 компонента:

- мягкий или мало проникающий компонент объединяет электроны, позитроны и частично быстрые протоны с энергией порядка 100 МэВ;
- жесткий или сильно проникающий компонент состоит из отрицательно и положительно заряженных  $\mu$ -мезонов с энергией порядка 600 МэВ, небольшого количества сверхбыстрых протонов, с энергией более 400 МэВ;
- сильноионизирующий компонент – содержит продукты ядерных делений - протоны, альфа-частицы с энергией 10-15 МэВ;
- нейтронный компонент - нейтроны различных энергий.

На уровне моря космическое излучение состоит в основном, как правило, из мягкого и жесткого компонентов. Мягкий компонент поглощается слоями свинца толщиной 8-10 см и

железа 15-20 см, жесткий проходит через свинец толщиной более метра, его можно обнаружить под землей и под водой на глубине нескольких километров.

Частицы мягкого и жесткого компонента, обладая большими энергиями, создают наименьшую плотность ионизации в веществе. Поэтому их биологическая эффективность приравнивается к единице.

Частицы сильно ионизирующего компонента обладают большей плотностью ионизации. Их относительная биологическая эффективность (ОБЭ) приравнивается к ОБЭ протонов, нейтронов и альфа-частиц с энергией 10-15 МэВ. На уровне моря сильноионизирующие частицы составляют 0,5%, а слабо ионизирующие 95,5 %. Приведенные измерения показали, что на уровне моря за счет космических лучей образуется 2,74 пары ионов в  $1\text{см}^3$  воздуха за одну секунду. Это соответствует мощности дозы  $1,15 \cdot 10^{-9}$  рад/сек.

Тканевая доза космических лучей на 11 % больше чем в воздухе, так как сверхбыстрые нейтроны сталкиваясь с ядрами атомов С, О, N биологической ткани, вызывают их расщепление с образованием быстрых нейтронов, которые создают в тканях дополнительную ионизацию.

*Природные источники ионизирующего излучения.* Природная радиоактивность обусловлена радиоактивными изотопами естественного происхождения, присутствующих во всех оболочках Земли: литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере с момента возникновения нашей планеты. Сохранившиеся на нашей планете радиоактивные элементы (часть элементов, имеющих период полураспада до  $10^8$  лет, к настоящему времени распалась) условно можно подразделить на три группы:

1. Радиоактивные изотопы, входящие в состав радиоактивных семейств, родоначальниками которых являются уран-238, торий-232 и уран-235. После ряда превращений их конечным продуктом распада являются устойчивые изотопы свинца-206, 208, 209.

2. Генетически несвязанные с радиоактивными семействами радиоактивные элементы калий-40, кальций-48, рубидий-87, индий-113, селен-124, технеций-130, вольфрам-180, висмут-209.

3. Радиоактивные изотопы, непрерывно возникающие на Земле в результате ядерных реакций под воздействием космических лучей. Наиболее важными из них являются углерод-14, тритий, бериллий-7, бериллий-10.

Наиболее распространенным радиоактивным изотопом земной коры является рубидий-87, содержание которого значительно выше урана, тория и калия-40. Однако



радиоактивность калия-40 в земной коре превышает радиоактивность других естественных изотопов.

Главным источником поступления во внешнюю среду естественных радиоактивных веществ, к настоящему времени широко распространенных во всех оболочках Земли, являются горные породы, происхождение которых неразрывно связано с включением в их состав всех радиоактивных элементов, возникших в период формирования и развития планеты. Благодаря деструктивным процессам метеорологического, гидрологического, геохимического и вулканического характера, происходящим непрерывно, радиоактивные вещества подверглись широкому рассеиванию.

Какой бы объем земного вещества мы не взяли в нем всегда можно найти несколько десятков химических элементов. Многие элементы могут обнаруживаться в виде следов - в ничтожно малых количествах или как говорят, в исчезающих количествах. В воздухе, например, содержится самый редкий газ - ксенон, составляющий всего четыре стотысячные процента (по массе). Однако при этом в каждом кубическом сантиметре воздуха содержится около миллиарда атомов ксенона. В воде мирового океана в растворенном виде насчитывается до 50 разных элементов, атомы которых могут быть обнаружены в каждой капле воды. Несмотря на ничтожно малое содержание отдельных элементов в морской воде, они могут вызвать огромный эффект в биосфере, вступая в биогеохимические процессы, происходящие непрерывно. Например, содержащий в морской воде марганец, в количестве одной десятиллионной процента, в результате биогеохимических процессов образовал многомиллионные отложения в районе Читаури (Грузия). Такой же эффект рассеяния можно наблюдать в горных породах. Самый чистый минерал горный хрусталь содержит в каждом грамме многие миллионы атомов других элементов.

Как указывалось выше, большая часть естественных радиоактивных элементов содержится в горных породах, образующих толщу земной коры. Именно в горных породах преимущественно находятся тяжелые радиоактивные элементы (уран, торий, радий).

Уровни земной радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры.

В целом среднемировой радиационный фон колеблется в пределах 4-24 мкР/час. Есть, однако, такие места, где уровни земной радиации намного выше. В Бразилии в 600 км от Сан-Паулу на морском курорте уровень радиации превышает средний примерно в 600 раз. Гурапари - небольшой город (Бразилия), здесь уровень радиации превышает средний примерно в 150 - 200 раз. Эти города стоят на песках, богатых торием.

В другой части света, на юго-западе Индии 70000 человек живут на узкой прибрежной песчаной полосе, богатой торием. Уровень радиации здесь выше среднемирового в 50 - 100 раз.

Иран, город Рамсер: бьют ключи, богатые радием. Уровень радиации здесь превышает среднемировой в 400 раз.

Основную дозу облучения от естественных источников радиации земного происхождения организм получает за счет внутреннего поступления их с пищей, водой и воздухом.

Значительную дозу внутреннего облучения организм получает от нуклидов радиоактивного семейства урана-238 и в меньшей степени - от радионуклидов семейства тория-232.

Например, нуклиды свинца-210 и полония-210 поступают в организм с пищей. Они концентрируются в рыбе и моллюсках, поэтому люди, потребляющие много рыбы и других даров моря, могут получить относительно высокие дозы облучения. Десятки тысяч людей на Крайнем Севере питаются в основном мясом северного оленя (карибу), в котором оба упомянутых выше радиоактивных изотопа присутствуют в довольно высокой концентрации. Эти изотопы попадают в организм оленей зимой, когда они питаются лишайниками, которые накапливают оба изотопа. А в другом полушарии люди, живущие в Западной Австралии в местах с повышенной концентрацией урана, получают дозы облучения, в 75 раз превосходящие средний уровень, поскольку едят мясо и требуху овец и кенгуру.

Итак, естественный радиационный фон является одним из экологических факторов окружающей среды для всех живых организмов Земли. Действие его извечно, непрерывно и отличается широкой вариабельностью в природе.

Вопрос о роли естественного радиационного фона для растительного и животного мира на сегодняшний день не решен. Высказываются мнения о выработавшейся адаптации в ходе эволюции к сравнительно невысоким дозам облучения, имеются данные о положительном действии радиации на жизнедеятельность организмов.

Вместе с тем появляются все больше данных, указывающих на то, что природный фон является частично ответственным за спонтанное появление опухолей разного вида и появление мутации, обусловленных повреждением хромосом.

### **Технологически измененный естественный радиационный фон (ТИЕРФ)**

Представляет собой ионизирующие излучения от естественных источников, претерпевших определенные изменения в результате деятельности человека. Например,

излучение от природных радионуклидов, поступающих в биосферу вместе с извлеченными на поверхность Земли из недр полезными ископаемыми такими как нефть, минеральные удобрения, а также в результате поступления в окружающую среду продуктов сгорания органически топлива, излучения в помещениях, построенных из материалов, содержащих естественные радионуклиды. Сюда же относят дополнительное облучение за счет полетов на современных самолетах, а также облучение в быту, например при ношении часов, на циферблате которых нанесены светосоставы постоянного действия, содержащие естественные радионуклиды.

*Искусственный радиационный фон (ИРФ).* С началом широкого испытания ядерного оружия возникло глобальное загрязнение биосферы искусственными радионуклидами. К нему присоединяются загрязнения локального, регионального и глобального характера обусловленные отходами предприятий ядерной энергетики и источники ионизирующих излучений, используемых в научных целях, в медицине и в народном хозяйстве.

Значительное загрязнение окружающей среды возникает в результате аварий на АЭС.

Излучение, обусловленное рассеянными в биосфере искусственными радионуклидами, представляет собой искусственный радиационный фон, который в настоящее время в целом по земному шару добавляет к *ЕРФ* порядка 1 - 3%.

Мерой РФ является мощность поглощенной дозы. В геофизике при этом имеется ввиду мощность поглощенной в воздухе дозы на местности, за счет внешних источников облучения. В медицинской и биологической практике РФ выражают также в показателях мощности поглощенной дозы в тканях организма. При этом учитываются дозы, обусловленные как внешним облучением, так и внутренним, за счет радионуклидов, попавших в организм. Оценивая РФ на местности, измеряют мощность поглощенной в воздухе на высоте 110 см от поверхности земли (соответствует центру тела взрослого человека).

Для удобства сравнения биологической эффективности оценки риска возникновения отдаленных последствий при различных видах облучения, включая случаи неравномерного облучения, дозы за счет РФ часто выражают в показателях эффективной эквивалентной дозы – условного понятия, характеризующего его расчетную дозу равномерного внешнего облучения всего тела, адекватную риску возникновения отдаленных стохастических последствий реальной поглощенной дозы в том или ином органе.

### **Радиоактивность атмосферы**

Радиоактивность атмосферного воздуха обусловлена наличием в ней радиоактивных веществ, находящихся в газообразном состоянии (радон, торон, углерод, тритий) или в виде

аэрозолей калия, урана, радия и других природных радиоактивных изотопов. Радионуклиды могут поступать в атмосферу различными путями. Радон-222 и радон-220 (торон), являющимися продуктами распада соответственно радия-226 и радия-224, поступают в атмосферу из земных пород, а углерод и тритий образуются из атомов азота и водорода в результате действия на их ядра нейтронов вторичного космического излучения.

Радиоактивность воздушной среды варьирует в широком диапазоне и зависит от местонахождения (суша, море), концентрации радионуклидов в материковых земных породах, времени года, состояния атмосферы и т.д. Средние концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе для  $\alpha$ -активных аэрозолей составляют  $4 \cdot 10^{-13}$  Ки/л,  $\beta$ -активных  $3,1 \cdot 10^{-13}$  Ки/л. Концентрация радона и торона в приземных слоях воздуха в среднем составляет  $7,1 \cdot 10^{-14}$  Ки/л. Следует отметить, что в воздухе городов с интенсивным движением транспорта и развитой промышленности радиоактивность пыли обусловлена калием-40, а радиоактивность дыма изотопами калия и углерода.

Концентрация радона, как наиболее значимого из всех радионуклидов воздуха в жилых домах и рабочих помещениях существенно различается в зависимости от того, какие строительные материалы использовались для их постройки. Так в домах, построенных из дерева, кирпича и бетона, концентрация радона в воздухе составляет соответственно 0,41, 1,08 и 3,13 пКи/л. Причина различий - неодинаковое содержание предшественника радона радия-226. На концентрацию радона в воздухе помещений влияет интенсивность воздухообмена. При недостаточной вентиляции концентрация радона в воздухе помещения может возрасти в несколько или в десятки раз.

Заметное влияние на радиоактивность атмосферы оказали испытания ядерного оружия. В течение 1945-1980 гг. в атмосфере было осуществлено более 400 ядерных взрывов суммарной мощностью 550 Мт с выбросом примерно 12,5 т продуктов деления (при взрыве атомной бомбы в Хиросиме было выброшено 1,1 кг продуктов деления). Наиболее интенсивно испытания ядерного оружия в атмосфере проводились в 1954 – 1958 гг. и 1961 – 1962 гг. Суммарная активность для выброса в атмосферу для долгоживущих радионуклидов составила: тритий -  $2,4 \cdot 10^{20}$  Бк, углерод-14 -  $2,2 \cdot 10^{17}$  Бк, цезий-137 -  $9,6 \cdot 10^{17}$  стронций-90 -  $6 \cdot 10^{17}$  Бк.

Содержание радиоактивных продуктов ядерных взрывов в атмосфере было максимальным в период интенсивных испытаний ядерного оружия. После 1963 г. появилась тенденция к снижению концентрации искусственных радионуклидов в атмосфере. В 1983 - 1985 гг. отмечался минимальный уровень радиоактивного загрязнения, составлявший в среднем для цезия-137 - 1-5 мкБк/м<sup>3</sup>, стронция-90 - 1-4 мкБк/м<sup>3</sup>. Это

примерно в 30 раз меньше концентрации космогенного радионуклида естественного происхождения бериллия-7.

Основной величиной, используемой для оценки последствий испытаний ядерного оружия, принята т. н. ожидаемая коллективная доза, накапливаемая населением в результате полного распада радионуклидов. Ожидаемые дозы от короткоживущих продуктов деления к настоящему времени сформированы. Интервал времени накопления дозы, обусловленной углеродом-14 и некоторыми изотопами трансурановых элементов, измеряется десятками тысяч лет суммарная ожидаемая коллективная доза, от взрывов в атмосфере оценивается  $3 \cdot 10^7$  Зв. К 1980 г. человечество получило около 12 % ожидаемой коллективной дозы обусловленной испытаниями ядерного оружия.

В 1963 г. коллективная годовая доза, связанная, с ядерными испытаниями, составила около 7% облучения от естественных источников радиации, а в начале 1980-х гг. уменьшилась до 1 %.

В радиоактивных выбросах АЭС в атмосферу преобладают инертные радиоактивные газы - изотопы ксенона, криптона и аргона. Для снижения радиоактивности этих газов на АЭС осуществляется их временная задержка в реакторе (для распада короткоживущих радионуклидов) перед выбросом в атмосферу.

Среди инертных радиоактивных газов особую значимость имеет криптон-85 (период полураспада 10,7 года). Он поступает в атмосферу как в процессе эксплуатации АЭС, так и в результате деятельности заводов по регенерации ядерного топлива.

Увеличение концентрации криптона-85 в атмосфере может изменить электропроводность воздуха в результате ионизации и вызвать труднопрогнозируемые геофизические эффекты (уменьшение электрического заряда Земли, изменение геомагнитного поля и т. п.). За период 1960 - 1992 гг. концентрация криптона-85 в атмосфере Северного полушария выросла в 10 раз и составляла в среднем около  $1 \text{ Бк/м}^3$ , что в  $10^6$  раз ниже допустимой нормами радиационной безопасности. В настоящее время невозможно однозначно ответить на вопрос о влиянии повышения концентрации криптона-85 на электрическое состояние атмосферы, поскольку для этого необходим учет всех основных факторов, влияющих на электропроводность воздуха (не только увеличивающих, но и уменьшающих ее значение, в части, загрязнение атмосферы аэрозолями). Не исключено, однако, что для криптона-85 и некоторых других радионуклидов может потребоваться разработка специальных экологических нормативов, более жестких по сравнению с радиологическими.

Кроме инертных радиоактивных газов объекты ядерной энергетики выбрасывают в атмосферу такие экологически значимые радионуклиды, как тритий, углерод-14, стронций-90, йод-131, цезий-137. Влияние АЭС на радиоактивное загрязнение атмосферы проявляется главным образом в присутствии в ней следовых количеств т. н. техногенных радионуклидов - хрома-51, марганца-54, кобальта-58, кобальта-60, циркония-95, ниобия-95, йода-131 и т. п. Вероятность обнаружения большинства техногенных радионуклидов не превышает нескольких процентов на расстоянии более 10 км от АЭС. В отдельных случаях следовые количества йода-131 и коррозионных нуклидов обнаруживаются на расстоянии 30 - 50 км от АЭС.

Наряду с АЭС другие объекты ядерной энергетики также производят выбросы радионуклидов в атмосферу. Так, по данным службы контроля за выбросами Горно-химического комбината (Красноярск-26), максимальная концентрация аэрозолей наблюдается на удалении 4,5 км от комбината. При этом в среднем с вероятностью 70 - 90 % в пробах воздуха обнаруживаются такие радионуклиды, как хром-51, цирконий-95, ниобий-95, рутений-103, рутений-106, а также цезий-137 и стронций-90 (последние два обнаруживаются постоянно). Для большинства других радионуклидов вероятность их обнаружения в аэрозолях в радиусе 15 км резко уменьшается, причем концентрация кобальта-60, циркония-95, ниобия-95, рутения-103, рутения-106 снижается в среднем в 2 - 3 раза, а цезия-137 - в 20 раз.

В местах проведения ядерных взрывов или при авариях на ядерных объектах образуются т. н. горячие частицы - мельчайшие частицы пыли с высокой искусственной активностью.

Существенное воздействие на радиоактивное загрязнение атмосферы оказала черновыльская авария. В первые дни после аварии на значительной территории Белоруссии, Украины, ряда областей России было зафиксировано заметное превышение допустимой концентрации йода-131 в воздухе. Наблюдалось увеличение радиоактивности атмосферных выпадений на обширной территории от Бреста до Владивостока, а также за пределами СССР. В некоторых местах максимальная величина радиоактивности выпадений в десятки тысяч и более раз превышала до аварийный уровень. Это привело к существенному загрязнению природных и агроэкосистем. После распада короткоживущих радионуклидов радиоактивное загрязнение воздуха на большой части аварийного Чернобыльского следа определялось цезием-137 и цезием-134. В течение первого месяца после аварии радиоактивное загрязнение атмосферы значительно снизилось. Иногда этот процесс интерпретируется как «самоочищение» природной среды.

Однако следует учитывать, что уменьшение радиоактивности атмосферы фактически означало накопление радионуклидов в почве, донных отложениях и пищевых цепочках экосистем. Следовательно, очищение атмосферы сопровождалось долгосрочным загрязнением живого вещества биосферы. Так содержание цезия-137 в компонентах природной среды даже на дальней границе чернобыльского следа в течение длительного времени существенно превышает доаварийный уровень.

На территории чернобыльского следа наблюдалось кратковременное увеличение радиоактивного загрязнения воздуха вследствие вторичного ветрового переноса радионуклидов из загрязненных районов. Так, в результате пыльной бури в южных и центральных районах Украины и России в апреле 1987 г. в отдельные дни радиоактивность атмосферных аэрозолей увеличивалась в десятки и сотни раз. При этом максимальная концентрация радионуклидов в воздухе была, по крайней мере, в 20 раз ниже уровня, регламентированного нормами радиационной безопасности.

### **Радиоактивность гидросферы**

Радиоактивность водной среды формируется радионуклидами естественного происхождения, радиоактивными продуктами ядерных взрывов, выбросами и сбросами объектов ядерной энергетики и промышленности.

Все воды условно можно разделить на метеорные (атмосферные осадки), подземные, воды открытых водоемов суши (реки и озера) и воды морей и океанов. Радиоактивность каждой из указанных вод имеет свои особенности.

Воды метеорные обычно малоактивные. Они содержат следы трития, углерода-14, бериллия-7, возникающие в результате взаимодействия космического излучения с атомами и молекулами атмосферного воздуха. А также калий-40 и уран-238, которые входят в состав растворимых солей, попадающих в атмосферу в связи с эоловой (ветровой) эрозией земной поверхности, висмут-210 и полоний-210 -долгоживущие дочерние продукты распада радона.

Радиоактивность подземных вод зависит от условий их нахождения. По характеру залегания подземные воды могут быть разделены на воды первого водоносного горизонта (грунтовые воды), скапливающиеся на первом от поверхности водоупорном слое, и воды межпластовые, находящиеся между водоупорными слоями в толще осадочных пород. Радиохимический состав подземной воды зависит от количества растворимых радиоактивных веществ, которые содержатся в составе грунта, омываемого этой водой. Кроме того, на концентрацию радиоактивных изотопов в воде первого водоносного горизонта оказывают влияние климатические и метеорологические условия. Так

радиоактивность этой воды по калию-40 в Голодной степи достигает 207 Бк/л. В степях Ферганы – 36 Бк/л, а в Карелии –  $8,5 \cdot 10^{-2}$  Бк/л. В водах, глубоко залегающих и более минерализованных, чем на поверхности имеет место пропорциональное увеличение удельной активности с нарастанием общей концентрации солей. Радиоактивность подземных вод в основном обусловлена присутствием в них калия-40, радия-226, радона-222. Наименьшей активностью обладают подземные воды в осадочных породах. Эти воды, чаще всего используемые для водоснабжения населения содержат урана в среднем  $5 \cdot 10^{-6}$  г/л, радия –  $7,4 \cdot 10^{-2}$  Бк/л и радона 1,85 Бк/л. Воды кислых магматических пород, например, воды трещиноватых гранитов, имеют более высокую активность по указанным элементам. Наибольшей радиоактивностью обладают минеральные воды, которые в гидрогеологии относятся к радиоактивным.

Высокие концентрации радия и урана обнаруживаются в межпластовых водах нефтеносных районов.

Радиоактивность воды открытых водоемов суши зависит от химического состава пород и климатических условий. Степень радиоактивности речной воды обусловлена типом питания рек: поверхностным и грунтовым. Причем тип питания в свою очередь зависит от смены сезонов года и влияния метеорологических факторов. Как правило, поверхностные воды (дождевые, ледниковые, снеговые) содержат относительно меньшее количество радиоактивных веществ, поэтому в период паводка радиоактивность речной воды понижена. В межень, в период питания рек в основном за счет подземных вод радиоактивность воды повышается. В зимний период в воде рек, покрывающихся льдом, наблюдается накопление радона, торона. Радиоактивность речной воды обусловлена в основном присутствием калия-40 и радия-226, причем содержание калия-40 колеблется в пределах от  $3,7 \cdot 10^{-2}$  до 0,6 Бк/л, урана от  $2 \cdot 10^{-8}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  г/л и радия от  $9,2 \cdot 10^{-3}$  до  $7,4 \cdot 10^{-2}$  Бк/л.

Радиоактивность воды озер зависит от активности притоков и питающих озера подземных вод. В северных районах активность воды озер близка к активности воды рек. В южных районах, где испарение воды из озер превышает сток, в них имеет место накопление солей и соответственно увеличение удельной активности воды. Так удельная активность воды в центральных областях Казахстана по калию-40 повышается до 3,7 Бк/л и более. Особенно высокая радиоактивность воды характерна для солевых озер, где она достигает 370 Бк/л.

Воды морей и океанов в зависимости от гидрологических и климатических условий имеют различную радиологическую характеристику в зависимости от солевого состава,



обуславливающего определенные колебания в составе радиоактивных веществ. Активность морской и океанской воды по калию-40 находится в пределах 11-18 Бк/л, содержание урана-238 –  $2 \cdot 10^{-6}$  г/л, радия-226 -  $2,2 - 3,7 \cdot 10^{-2}$  Бк/л.

Начиная с 1945 г. в связи с испытаниями и применением ядерного оружия, а развитием ядерной промышленности и энергетики в биосферу, в т. ч. гидросферу стало поступать большое число радионуклидов искусственного происхождения. Наиболее существенными в экологическом и гигиеническом отношении являются как сравнительно долгоживущие радионуклиды, так и биологически активные, играющие важную роль в биогенных круговоротах: тритий, углерод-14, фосфор-32, марганец-54, железо-59, кобальт-60, цинк-65, стронций-90, рутений-106, йод-131, цезий-137, церий-144, плутоний-239 и др.

*Поведение радиоактивных веществ в открытых водоемах.* При поступлении радиоактивных веществ в воду открытых водоемов в первую очередь отмечается их разбавление, поглощение тканями гидробионтов. Эффективность процесса разбавления в реках и замкнутых водоемах неодинакова. Степень и скорость этого явления в реках зависит от ряда гидрологических причин: соотношения объема загрязнений и расхода воды в реке, скорости течения, турбулентности, водного потока, глубины формы русла, рельефа дна и т. д. В малых реках горного типа максимальное разбавление радиоактивных веществ происходит в течение нескольких минут, на реках равнинного типа, с выраженной струйностью течения, протяженность участка, на котором заканчивается разбавление, может достигать десятков километров. Интенсивность разбавления в замкнутых водоемах (пруды, озера, водохранилища) значительно меньше. Разбавление в них происходит за счет течений, волнового режима и в определенной степени процесса диффузии.

В морях и океанах скорость разбавления радиоактивных продуктов зависит в первую очередь от скорости и перемещения (течения) водных масс и процессов перемешивания. Так, после испытаний ядерного оружия в США в районе Маршалловых островов в 1954 г. радиоактивные продукты, попавшие в воду, первоначально перемещались в западном полушарии к азиатскому материку, затем загрязнение распространилось к северу по течению Куро-Сиво. При этом продукты деления за 40 дней переместились на 192 км, продиффундировав на глубину 40 - 60 м. Разбавление введенной активности в 0,37 ТБк (1000 Ки) было таково, что средняя концентрация после 40 дней равнялась 5,5 кБк/л ( $1,5 \cdot 10^{-7}$  Ки/л), а площадь загрязнения составляла около 40 км<sup>2</sup>.

Одновременно с разбавлением радиоактивных изотопов в воде открытых водоемов отмечается и их интенсивная сорбция дном и донными отложениями. В

результате дно становится своеобразным депо долгоживущих элементов. Степень накопления дном радиоактивных продуктов зависит от структуры грунта. При возрастании ионообменной емкости грунта, степень накопления изотопов возрастает. Так, при внесении в воду экспериментального пруда  $^{90}\text{Sr}$  и активности воды 740 Бк/л ( $2 \cdot 10^{-8}$  Ки/л) коэффициент накопления (отношение удельной активности грунта к удельной активности воды) для песка составлял 20, для суглинка - 110. Существенную роль в накоплении дном радиоактивных веществ играют их химические свойства. Слабо фиксируется грунтом дна  $^{35}\text{S}$ , лучше -  $^{32}\text{P}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и др. Количество радиоактивных продуктов в грунте зависит от удельной активности воды, а именно возрастает с ее увеличением, хотя коэффициент накопления при этом уменьшается. Если дно состоит из плотных глинистых пород, распространение продуктов деления урана в глубину достигает 15 см, на большей глубине наблюдается резкое уменьшение активности. Проникновение в глубину рыхлого дна, сложенного, например, из торфа, достигает 1,5 м и более. Подобная картина характерна и для песчаных грунтов.

При постоянстве концентраций радиоактивных изотопов в воде возникает устойчивое динамическое равновесие с содержанием их в донном грунте. При снижении активности воды обычно отмечается медленный процесс десорбции радиоактивных веществ из донного грунта и их поступление в воду. Таким образом, дно в этом случае может быть источником вторичного загрязнения воды.

Наряду с разбавлением радиоактивных веществ в воде и сорбцией дном отмечается их накопление в гидробионтах. Это накопление происходит в результате адсорбции и диффузии, поступления через органы дыхания и алиментарным путем.

Механизм накопления радиоизотопов микрофлорой зависит от их химических свойств. Так, кальций для бактерий не является биогенным элементом, поэтому накопление радиоактивного стронция бактериями происходит за счет процесса физико-химической адсорбции атомов этого элемента на поверхности бактериальных клеток. В противоположность стронцию биогенный элемент  $^{32}\text{P}$  ассимилируется бактериями в значительном количестве. Результаты экспериментальных исследований показывают, что при внесении в микробную взвесь радиоактивных веществ уже через несколько минут удельная активность бактериальных тел становится во много раз выше по сравнению с таковой водной среды. При этом с увеличением концентрации микробных клеток процент извлеченных радиоактивных продуктов не возрастает. Таким образом, коэффициент накопления увеличивается при уменьшении числа микроорганизмов в водной среде. Кроме того, обнаружено уменьшение коэффициента

накопления с возрастанием удельной активности воды. В зависимости от химических свойств радиоизотопов, вида микроорганизмов, удельной активности воды, ее pH и других условий коэффициент накопления для бактериальных клеток колеблется в широких пределах от 100 до 4-6 млн и более.

Большая удельная поверхность тела планктона губок и некоторых других гидробионтов создает благоприятные условия для адсорбции ими значительного количества радиоактивных изотопов. Следует отметить, что скорость накопления планктоном радиоактивных веществ довольно значительна. Так, дафния накапливает 50 - 60% (от предельного количества) радиоактивного стронция в течение 5 мин.

В последующем накоплении принимают участие и обменные процессы. Время, необходимое для максимального накопления радиоактивных продуктов зоопланктоном, составляет, составляет несколько часов.

У водных растений процесс накопления более медленный, так как главный путь поступления в радиоактивных продуктов обусловлен процессами обмена. Предельное накопление в водорослях происходит в течение 7 - 30 сут.

У рыб основной путь поступления радиоактивных веществ в организм - алиментарный. Поэтому в данном случае существенное значение имеют уровни загрязнения низших организмов, являющихся кормом для рыб. Вместе с тем радиоактивные изотопы проникают в организм рыбы и через жабры. Значимость этого пути возрастает с повышением удельной активности. Время предельного накопления изотопов (при постоянстве концентрации) в теле рыб колеблется от 10 до 120 дней.

Коэффициент накопления радиоактивных веществ тканями гидробионтов зависит от вида гидробионта, физико-химических свойств радиоизотопов, удельной активности воды, ее солевого состава, температуры и прочих условий. Водные организмы более интенсивно накапливают радиоизотопы биогенных элементов (фосфор, углерод и др.) и элементы, родственные им по своим химическим свойствам. Как и для бактерий, коэффициенты накопления для гидробионтов уменьшаются с возрастанием удельной активности воды. Коэффициенты накопления у пресноводных организмов значительно выше, чем у обитателей морей и океанов. Так, рыба, обитающая в пресной воде, накапливает в 10 раз больше радиоактивного стронция, чем рыба морская. Накопление радиоизотопов молодью рыбы интенсивнее (за счет более высокого уровня обмена веществ у взрослых особей). Оптимальные уровни температуры воды для ее обитателей обычно соответствуют максимальному накоплению радиоактивных продуктов.

В зависимости от указанных условий коэффициент накопления радиоактивных веществ для планктона соответствует величинам от 250 до 7500 и более, для водорослей – 100 - 28 000, для рыбы – 4 - 130.

При снижении удельной активности воды имеет место выведение накопленных радиоактивных элементов из организма гидробионтов, причем интенсивность этого процесса тем выше, чем выше концентрация радиоактивных веществ в тканях. В среднем в течение 10 дней пребывания в чистой воде планктон и водоросли теряют 95 - 97 от общего количества накопленных продуктов. Выведение из тканей и органов рыб происходит с разной скоростью. Так,  $^{90}\text{Sr}$  даже через 3 месяца пребывания рыбы в чистой воде обнаруживается в ее мышцах в количестве до 10%, а в костях - до 50% от первоначального уровня.

При попадании радиоактивных веществ в водоем отмечается их миграция на прибрежную территорию за счет метеорологических, гидрологических и биологических факторов. Важное место в миграции радиоизотопов принадлежит и деятельности человека. Роль метеорологического фактора заключается в переносе радиоактивных аэрозолей, возникающих в пределах зоны загрязнения водного бассейна. Загрязнение прилегающей территории возможно при разливах в период паводка (при этом почва активно адсорбирует радиоактивные продукты из воды). В процессе миграции радиоактивных элементов из водоема принимают участие прибрежные растения (ольха, ива и др.), насекомые, личиночная стадия которых протекает в водоеме, земноводные и водоплавающие птицы. Основная роль в рассеивании радиоизотопов из водоемов принадлежит хозяйственной деятельности человека.

*Поведение радиоактивных веществ в подземных водах.* Основными факторами, определяющими поведение радиоактивных изотопов, попадающих в подземные воды, являются пути их поступления и физико-химические свойства, а также местные гидрогеологические условия, включающие геологическое строение участка и окружающего района, условия питания, движения и дренирования подземных вод, их химический состав, гидродинамическую обстановку в водоносном горизонте. Совокупность и переплетение этих факторов обуславливают то многообразие в поведении и миграции радиоактивных веществ, которые могут создаваться в реальной обстановке.

По условиям формирования и поведения подземные воды разделяются на два основных типа: ненапорные (грунтовые) и напорные (артезианские). Основная особенность грунтовых вод заключается в том, что они имеют непосредственное питание от атмосферных осадков и поверхностных вод. В свою очередь грунтовые воды, по

условиям возможного питания, подразделяются на воды, приуроченные к участкам, удаленным от открытых водоемов, и на воды, находящиеся на участках, расположенных вблизи рек и других водоемов.

Напорные (артезианские) воды не питаются непосредственно атмосферными осадками, а пополняются из других водоносных горизонтов путем медленной нисходящей или восходящей фильтрации подземных вод через толщу относительно водоупорных пород или за счет атмосферных осадков, но из весьма отдаленных областей питания. В областях питания артезианских вод, приуроченных к возвышенным формам рельефа, наряду с перемещением вод по водоносному пласту имеет место нисходящая фильтрация их из одного водоносного горизонта в другой. В районах дренирования (пониженные участки долин основных рек, озерные впадины, морские побережья и др.) артезианские воды имеют восходящее движение из одного водоносного горизонта в другой.

В рыхлых осадочных породах (галечники, пески, глины) движение воды происходит по порам, образовавшимся между отдельными зернами и частицами, слагающими эти породы. В пределах водоносного горизонта поры чаще всего распределены довольно равномерно, поэтому движение воды в нем относительно равномерное. Обычно в песках скорость перемещения подземных вод составляет от десятков сантиметров до 1 - 2 м в сутки, в глинистых породах - до нескольких миллиметров.

В трещиноватых скальных породах (известняки, песчаники, кварциты, граниты) наблюдается движение воды по отдельным трещинам. Эти трещины распределены в породах неравномерно, в связи с этим могут встречаться локальные зоны повышенной трещиноватости, где проходят мощные потоки подземных вод. Скорость перемещения воды в этих породах может достигать нескольких километров в сутки.

На скорость движения подземных вод оказывает влияние не только состав горных пород, но и интенсивность водообмена. Интенсивность водообмена характеризует время, в течение которого вода, находящаяся в водоносном горизонте, полностью замещается новой водой, поступающей за счет инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных вод и т. д. Полный водообмен водоносных горизонтов обычно происходит в течение сотен тысяч и более лет, причем для более поверхностно залегающих горизонтов сроки полного водообмена меньше. Интенсивность водообмена также зависит от проницаемости горных пород, рельефа местности. В горных районах, рельеф которых расчленен глубокими долинами, интенсивность водообмена выше, чем в равнинных районах со слабым развитием сети оврагов. Наконец, в засушливых областях питание подземных вод и водообмен водоносных горизонтов менее выражены, чем в зонах с влажным климатом.

Таким образом, в зависимости от гидрогеологических условий миграция радиоактивных веществ в подземных водах будет зависеть от количественных соотношений скорости движения подземных вод и интенсивности их разбавления.

Подземные воды при их движении взаимодействуют с горными породами. Это взаимодействие сводится к процессам выщелачивания и растворения горных пород и, наоборот, к процессам сорбции породами ряда веществ, содержащихся в воде. Сорбция породами химических веществ в основном определяется ионообменными процессами и химически обусловленной поглотительной способностью пород, заключающейся в том, что ряд веществ, находящихся в воде, может давать нерастворимые соединения при взаимодействии с веществами, содержащимися в горных породах. Радиоактивные изотопы, подобно макрокомпонентам природной воды, поглощаются горными породами. Однако этому процессу свойственны и особенности, определяющиеся чрезвычайно малой концентрацией радиоактивных продуктов (за исключением природного урана, который может содержаться в подземных водах в макроколичествах). Сорбционная способность горных пород составляет в среднем десятки миллиграмм-эквивалентов на 100 г природного сорбента. Поэтому поглотительная емкость горных пород всегда много выше возможного содержания в воде радиоактивных веществ. Степень поглощения радиоактивных веществ породами зависит от химических свойств сорбирующих изотопов. Так, плутоний наиболее интенсивно поглощается породой в трехвалентном состоянии, четырехвалентный плутоний поглощается менее энергично, плохо сорбируется  $\text{PuO}_2^{2+}$ . Уран в четырехвалентном состоянии плохо растворим и практически не мигрирует в подземных водах, уран шестивалентный высокоподвижен.

В ряде работ отечественных исследователей было отмечено, что с увеличением солевого состава раствора уменьшается поглощение сорбентом радиоактивных веществ. Так, с повышением концентрации ионов натрия и калия падает сорбция изотопов цезия и стронция.

Степень поглощения радиоактивных продуктов зависит от типа горных пород, т. е. от их минералогического, химического, механического состава, а также от структуры и сложения породы. С увеличением в породе числа мелких глинистых частиц и повышением ионообменной емкости сорбентов возрастает сорбционная способность породы.

В процессе миграции радиоактивных веществ в подземных водах важное значение имеют не только процессы сорбции отдельных элементов, но и явления десорбции, которые могут иметь место при резком уменьшении удельной активности воды. Степень

десорбции изотопов в значительной степени зависит от механизмов поглощения отдельных радиоэлементов горными породами. Легче всего десорбируются изотопы тех элементов, которые сорбируются породой по ионообменному механизму поглощения.

В целях установления характера миграции радиоактивных веществ в подземных водах были проведены экспериментальные исследования в натурных условиях, а также использованы данные ионообменной хроматографии для прогнозирования миграции радиоактивных продуктов с подземными водами. На основании полученных результатов были разработаны методы оценки процесса проникновения радиоактивных веществ в грунтовые воды с поверхности земли, условий перемещения вод в водоносных горизонтах и фильтрации вод, содержащих радиоактивные изотопы, через водоупорные пласты. Результаты расчетов показали, что например, через 40 лет после загрязнения земли на глубине 1 м  $^{90}\text{Sr}$  его относительное содержание в воде, проникающей через делювиальные глины, составит около  $4 \cdot 10^{-3}$ , а через 100 лет на глубинах глины 1,2 и 3 м относительное содержание его будет соответственно 0,1,  $8 \cdot 10^{-4}$  и  $2 \cdot 10^{-5}$  от начальной концентрации. Таким образом, покровные глинистые породы интенсивно задерживают  $^{90}\text{Sr}$  в инфильтрирующихся водах. Однако при массивном загрязнении поверхности земли на больших территориях в районах с грунтом повышенной фильтрационной способности (супесь, легкий суглинок) не исключено попадание стронция в неглубоко залегающие грунтовые воды через десятки лет. Оценка возможного распространения радиоактивных веществ из одного артезианского горизонта в другой показывает, что даже в случаях облегченной фильтрации вод через глинистые породы скорость движения воды, содержащей радиоактивные изотопы, будет достигать всего лишь 0,65 м за 10 лет и 1,3 м за 100 лет. Поэтому основная роль в миграции радиоактивных веществ в подземных водах принадлежит горизонтальному распространению по водоносному горизонту. При постоянном поступлении в водоносные горизонты через поглощающую скважину  $^{90}\text{Sr}$  в зависимости от структуры осадочной породы и расхода поступающих растворов, радиус распространения зоны с относительным содержанием этого изотопа до 50% от исходной концентрации, через 100 лет может оказаться в пределах от 50 до 550 м и более. В трещиноватых породах этот радиус может достигать десятков километров.

Таким образом, приведенные сведения позволяют считать, что в большинстве случаев миграция искусственных радиоактивных веществ в подземных водах по сравнению с водами открытых водоемов в значительной мере ограничена.

Кроме того, в водные объекты радиоактивные элементы могут попадать при работе АЭС как при аварийных ситуациях, так и при штатном режиме. Жидкие сбросы с АЭС

радионуклиды попадают при появлении протечек промконтура, системы охлаждения конденсаторов турбин, а также с дебалансными водами. Больше всего водоемы-охладители загрязнены тритием. В основном влияние АЭС на увеличение радиоактивности воды прослеживается в сбросных каналах и прилегающей к ним акватории водоема-охладителя. Поскольку радиоактивность жидких сбросов АЭС, как правило, весьма мала и не превышает контрольных уровней, регламентированных нормами радиационной безопасности, концентрация техногенных радионуклидов в воде существенно ниже уровня естественного радиоактивного фона и не представляет опасности для населения. Однако вследствие процессов накопления радионуклидов водными организмами вероятность обнаружения в них (особенно в водных растениях) техногенных радионуклидов существенно выше, чем в воде. Для большинства рыб концентрация техногенных радионуклидов не превышает нескольких процентов от уровня естественного радиоактивного фона. Может наблюдаться биологический перенос техногенных радионуклидов реки, впадающие в водоем-охладитель. Дополнительные дозы облучения населения от потребления рыбы, выловленной в водоеме охладителе АЭС, как правило, не превышают 1 % дозы от воздействия ЕРФ (10 мкЗв/год). Уровень облучения водных организмов при нормальной эксплуатации АЭС не выходит за пределы малых доз.

Потенциальным источником поступления радионуклидов в водную среду являются хранилища радиоактивных отходов. Разгерметизация емкостей хранилищ и нарушения гидроизоляции могут привести к попаданию радиоактивных веществ в грунтовые воды. В 1990-е гг. были выявлены протечки жидкости, содержащей тритий, стронций-90, цезий-137, кобальт-60 и другие радионуклиды вблизи хранилищ радиоактивных отходов Ленспецкомбината (возле Ленинградской АЭС). Выявлено загрязнение грунтовых вод тритием, кобальтом-60, цезием-134, цезием-137 вблизи хранилища радиоактивных отходов Нововоронежской АЭС.

Значительный вклад в радиоактивное загрязнение гидросферы внесла чернобыльская авария. Наибольшее загрязнение водных экосистем отмечалось в конце апреля - в начале мая 1986 г. Концентрация радионуклидов в воде достигала в Припяти 10 кБк/л, в Днепре 4 кБк/л. Основное влияние на радиоэкологическую обстановку в этот период оказывали короткоживущие радионуклиды, прежде всего йод-131, концентрация которого в некоторых водоемах значительно превышала допустимую для питьевой воды. Концентрация йода-131 в тканях рыб, обитающих в Киевском и Каневском водохранилищах, за период 29 апреля - 3 мая 1986 г. составляла 1 - 10 кБк/кг.



Кроме йода-131, в первый послеаварийный период в воде присутствовали такие радионуклиды, как стронций-89, стронций-90, цирконий-95, ниобий-95, молибден-99, йод-132, цезий-134, цезий-137, рутений-103, рутений-106, теллур-132, нептуний-239 и др. По мере распада короткоживущих радионуклидов, их адсорбции частицами взвеси и перехода в донные отложения, радиоактивность воды уменьшалась. В июне 1986 г. она снизилась в сотни раз по сравнению с максимальным уровнем загрязнения и в значительной мере в дальнейшем определялась долгоживущими радионуклидами - цезием-137 и стронцием-90, причем наибольший уровень загрязнения наблюдался в ближайших к Чернобыльской АЭС реках Припять, Уж, Тетерев, Днепр (табл. 12 и 13).

Из таблицы 14 видно, что у хищных видов рыб отчетливо проявился эффект трофических уровней - процесс миграции радионуклидов по пищевым цепочкам, характеризующийся повышенным накоплением радиоактивного цезия в тканях хищных видов рыб по сравнению с растительноядными.

В зоне воздействия радиоактивного выброса ЧАЭС оказались кроме Украины многие области России, Белоруссии, стран Скандинавии и Западной Европы, т. е. подверглись загрязнению водоемы, находящиеся довольно далеко от источника аварийного выброса.

Таблица 12

Концентрация цезия-137 в компонентах водных экосистем в районах аварийного следа ЧАЭС (1986 г.)

Водоем	Концентрация цезия-137, кБк/кг сырого веса				
	Вода	Донные отложения	Водоросли	Моллюски	Рыба
Пруд-охладитель ЧАЭС	0,3-1,7	170-440	90-160	20-33	140-120
р. Припять	0,03-0,25	14-40	3,0	1,0	1-6
р. Уж	0,008-0,03	2-28	1,0	0,2-1,7	3
р. Тетерев	0,003-0,03	0,4-1,2	0,06-0,2	0,1-1,0	0,2-2,6
р. Днепр	0,002	0,2-1,3	0,07-0,7	0,2-0,5	0,4-0,7

Таблица 13

Концентрация стронция-90 в компонентах водных экосистем в районах аварийного следа ЧАЭС (1986 г.)

Водоем	Концентрация стронция-90, кБк/кг сырого веса				
	Вода	Донные отложения	Водоросли	Моллюски	Рыба
Пруд-охладитель ЧАЭС	0,01-0,03	5-27	18-50	40-52	1-2,4
р. Припять	0,02-0,024	0,6-0,63	0,2-2,8	-	0,1-1,4
р. Уж	0,0014	0,1	0,2-0,4	0,05-0,7	0,08
р. Тетерев	0,001-0,003	0,2	0,07-0,15	0,02-0,7	0,2
р. Днепр	0,0006	0,02	0,060,27	0,08-0,9	0,02-0,05

Таблица 14

Динамика концентрации цезия-137 в мышцах рыб Каневского водохранилища

Виды рыб	Концентрация цезия-137, Бк/кг сырого веса			
	1986 г.	1987 г.	1988 г.	1990 г.
Лещ	50-30	30-60	20	-
Густера	130	100	-	40
Окунь	180-280	180-460	140-210	150
Судак	190-240	200-270	170-220	180

Во многих озерах была отмечена повышенная концентрация цезия-137 в рыбе. В Швеции в водоемах с низким содержанием калия концентрация цезия-137 в окуне составляла в 1986—1987 гг. в среднем 7,4 кБк/кг (при диапазоне изменений 0,1 - 130 кБк/кг). Вследствие высокого уровня накопления и низких темпов снижения концентрации цезия-137 в рыбе эта пищевая цепочка до сих пор является одним из основных источников долговременного облучения населения в Финляндии. В России наиболее высокий уровень загрязнения рыбы радиоактивным цезием чернобыльского происхождения наблюдался в водоемах Брянской области. Так в 1990 - 1992 гг. концентрация цезия-137 в рыбе из озера Кожановское достигала 15-21 кБк/кг.

Существенно повлияли на радиоактивное загрязнение ряда водоемов Урала промышленные сбросы ПО «Маяк». С 1949 г. в реку Течу сбрасывались жидкие отходы радиохимического производства, в результате в речную систему Теча - Исеть - Тобол - Иртыш - Обь попало около 2,8 млн Ки жидких радиоактивных веществ.

В результате радиоактивного загрязнения речной системы повышенному облучению подверглись 124 тыс. человек, проживающих в прибрежных населенных пунктах.

В 1951 г. жидкие отходы начали сбрасываться в озеро Карачай. В этом озере находятся радиоактивные отходы, общая активность которых составляет около 120 млн Ки. Этот водоем используется как хранилище жидких радиоактивных отходов. В районе захоронения радиоактивных отходов на территории ПО «Маяк» сформировалась линза подземных вод площадью около 30 км<sup>2</sup>, значительная часть которой загрязнена радионуклидами до глубины 100 м. И поскольку эта территория дренируется реками Теча и Мишеляк существует потенциальная опасность загрязненных вод на поверхность.

Таким образом, радиозэкологическая обстановка бассейна реки Течи остается напряженной вследствие загрязнения экосистемы долгоживущими радионуклидами.

## Радиоактивность почв

Количество радиоактивных элементов, содержащихся в почвах, в значительной степени определяется концентрацией радиоизотопов в материнской породе. Почвы, возникшие из продуктов разрушения магматических пород, содержат относительно большее количество урана, радия, тория, калия, чем почвы образованные из ультраосновных и основных пород.

Глинистые почвы за счет высокого содержания коллоидных фракций, хорошо сорбируют и удерживают различные элементы, всегда богаче радиоактивными изотопами, чем песчаные. По данным А. П. Виноградова и В. И. Баранова, содержание урана в верхнем горизонте почв Среднерусской возвышенности колеблется в пределах от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $1,8 \cdot 10^{-4}$  %, а тория – от  $2,3 \cdot 10^{-4}$  до  $14 \cdot 10^{-4}$  %; калия - от 29,6 до 888 Бк/кг.

Как правило, в почве отсутствует равновесие между предшественником и дочерним нуклидом вследствие их неодинаковых химических свойств. Вместе с тем повсеместно отмечается избыточное (по отношению к  $^{226}\text{Ra}$ ) количество  $^{210}\text{Pb}$  в верхних горизонтах почв (0 – 5 см), причем запас избыточного  $^{210}\text{Pb}$  в верхних горизонтах почв колеблется в широких пределах. Считается, что основная причина накопления  $^{210}\text{Pb}$  в верхних слоях почвы – атмосферные выпадения, обусловленные атмосферными осадками и сухими выпадениями.

В разных районах земного шара доза гамма-излучения различных земных пород у поверхности колеблется в широких пределах: 26-1150 мрад/год.

Несомненный интерес представляет содержание радиоактивных веществ в строительных материалах, в производстве которых используются земные породы, от последних зависит уровни гамма-фона в помещениях зданий, сооружений. Наибольшие значения радиационного фона установлены в домах из железобетона с глиноземом – 171 мрад/год, наименьшие в деревянных домах – 50 мрад/год.

Искусственные радионуклиды, поступающие из атмосферы на поверхность суши в составе глобальных выпадений и выбросов предприятий ядерного топливного цикла, а также в виде твердых и жидких отходов этих предприятий обуславливает радиоактивное загрязнение почвы. При аварийных ситуациях, как показала катастрофа на ЧАЭС, уже на второй год после выпадений основной путь попадания радиоактивных веществ в пищевые цепи – поступление радионуклидов из почвы в растения. В сильно загрязненных районах России, Белоруссии и Украины радиоактивное загрязнение местности достигало уровней, при которых содержание изотопов в почве до сих пор остается основным фактором, обуславливающим опасные воздействия окружающей среды на человека.

Почвенная оболочка биосферы (педосфера) является одним из основных компонентов природы, где происходит локализация искусственных радионуклидов. Почвенный покров не всегда является первоначальнымместилищем искусственных радионуклидов, часто в качестве таковых выступают нижние слои атмосферы, куда производятся выбросы радионуклидов. Радиоактивные вещества, поступающие в атмосферу, под действием атмосферных явлений (осадки, гравитационные силы, вертикальное движение воздушных масс, турбулентная диффузия и др.) в конечном итоге концентрируются в почве. Через несколько лет после радиоактивных выпадений на земную поверхность поступление радионуклидов в растения из почвы становится основным путем попадания их в пищу человека и корм животных. Возможно также поступление в почву радионуклидов и после их сброса в речные системы с паводковыми водами, при орошении и т. п. Почва, обладающая большой емкостью поглощения, интенсивно сорбирует различные техногенные примеси, в т. ч. радионуклиды, являясь, таким образом, мощным депо радионуклидов.

Почва является сложной и изменяющейся системой, в составе которой выделяются несколько относительно однородных подсистем: 1) грубозернистая фракция - обломки первичных минералов горных пород; 2) тонкодисперсная фракция - вторичные глинистые минералы, гумус; 3) пленки-гели, покрывающие частицы, состоящие из оксидов железа, марганца, алюминия, кремниевой кислоты, органических веществ, солей и т. д.; 4) флора и фауна - корни растений, микроорганизмы принимающие участие в разложении мертвых остатков, и макроорганизмы, напр. черви, насекомые, некоторые млекопитающие, которые при движении в почве способствуют ее перемешиванию; 5) почвенные растворы; 6) почвенная атмосфера - газы.

Радиоактивные вещества, отложившиеся на поверхности почвы, могут перемещаться (мигрировать) в горизонтальном и вертикальном направлении под действием различных процессов. Причиной горизонтального передвижения свежевывавших радиоактивных веществ может быть поверхностный сток после сильного дождя. В сухую погоду перемещение радионуклидов может осуществляться в результате ветрового переноса вместе с пылью. Передвижение радиоактивных веществ вниз по профилю почвы может явиться следствием механического переноса частиц, на которых сорбированы радионуклиды, а также результатом собственного перемещения свободных ионов с водой через трещины, образующиеся в почве в сухую погоду. На обрабатываемых почвах радионуклиды оказываются сравнительно равномерно перемешанными в пределах пахотного слоя. Даже на

целинных участках возможен механический перенос радионуклидов вследствие роющей деятельности почвенных животных или вымывания частиц вниз по почвенному профилю.

Поведение попавших на поверхность почвы радионуклидов зависит от климата и ландшафтных особенностей. Так, стронций-90 из почв климатической зоны с повышенным увлажнением выносится более интенсивно благодаря обилию водорастворимых органических соединений. В почвах зоны с засушливым климатом стронций-90 аккумулируется на испарительных барьерах с образованием слаборастворимых карбонатов. В сопряженных ландшафтах (между водоразделами) наблюдается накопление стронция-90 в пониженных элементах рельефа. Минимальное содержание стронция-90 характерно для почвы водоразделов с промывным режимом.

Практически любое перемещение радионуклидов в почве до их поглощения живыми организмами осуществляется при участии воды, которая является главным агентом в любых перераспределениях радионуклидов в почве. В некоторых случаях радионуклиды быстро переходят в те же формы, в которых находятся в почве стабильные изотопы этих элементов. Однако чаще в почвенном растворе искусственные радионуклиды некоторое время сохраняют свою специфическую форму (зависящую от условий их образования), поэтому характер их миграции вначале не совпадает с характером миграции стабильных элементов. Но с течением времени искусственные радионуклиды обязательно переходят в устойчивые, характерные для данного элемента состояния и включаются в биогеохимические циклы. При попадании на почву крупнодисперсных нерастворимых (горячих) частиц последние задерживаются в ее верхних слоях значительно дольше, но и они постепенно разрушаются, и радионуклиды переходят в почвенный раствор.

Миграционные возможности радионуклидов, перешедших в водный раствор, их передвижение по почвенному профилю в основном определяются характером взаимодействия с почвой. Почва довольно прочно удерживает попадающие в нее радиоактивные вещества. Для подавляющего большинства радионуклидов, поглощение их почвой зависит от процессов распределения между двумя основными фазами - твердой и жидкой (почвенный раствор) и осуществляется главным образом в результате противоположных процессов: сорбции - поглощения твердым телом или жидкостью (сорбентом) вещества из окружающей среды, и десорбции - процесса освобождения сорбента от поглощенных им веществ; осаждения и растворения труднорастворимых соединений; коагуляции - слипания коллоидных частиц и пептизации - распада этих частиц. В свою очередь интенсивность этих процессов определяется типом почвы, обуславливающим химические и физико-химические условия среды; химическими

свойствами и формой находящихся в почве радионуклидов; концентрацией и формой нахождения изотопных и неизотопных носителей. Носителем называют весовое количество элемента, за которым «невесомое» (ультрамалое) количество элемента следует в химических реакциях. Изотопный носитель – это стабильный изотоп данного элемента, химические свойства которого тождественны его радиоактивному изотопу, например стабильный фосфор-31 и радиоактивный фосфор-32. Неизотопный носитель - стабильный изотоп или изотопы химического элемента, которые лишь аналогичны по групповым химическим характеристикам данному радионуклиду, например кальций - по ношению к радионуклидам стронция или калий - по отношению к радионуклидам цезия.

Проведение радионуклидов в почвах в процессах обменного поглощения подчиняется общим законам, которые были установлены классическим учением К. К. Гедройца о поглотительной способности почв. Однако процесс сорбции, в котором участвуют радионуклиды, характеризуется тем, что сорбируемое вещество находится в микроколичествах т.е. в предельно низких концентрациях. В связи с этим существует очень широкое отношение между величиной емкости поглощения почвы и степенью ее заполнения радиоактивными нуклидами. Следовательно, в процессе поглощения они не конкурируют за места на поверхности сорбента, так как по отношению к ним насыщенность сорбента всегда остается очень низкой.

В зависимости от типа почвы меняется степень поглощения радионуклидов, прочность их связи, а также сочетание тех или иных механизмов поглощения. Например, песчаная почва по сравнению с глиной и суглинком в меньшей степени удерживает радионуклиды вследствие структурных особенностей. С физико-химических позиций сорбционная способность почвы тем выше, чем больше в ней соединений, которые могут химически реагировать с радионуклидами. Глины и суглинки обладают высокой сорбционной емкостью, в силу чего продвижение в них радионуклидов затруднено. Относительно большой сорбционной способностью обладают черноземные почвы, что отчасти связано с наличием в их составе гумуса, который содержит высокомолекулярные вещества, находящиеся в коллоидном состоянии и отличающиеся хорошей обменной емкостью поглощения.

Прочность удержания радионуклидов на частицах грунта различна и зависит от химических свойств каждого из них. Так для осколочных радионуклидов (продуктов деления) поглощение почвой одного типа возрастает в ряду: рутений-106 – стронций-90 - церий-144 - цезий-137, а прочность связи возрастает в ряду: стронций-90 – рутений-106 - цирконий-95 – церий-144 – цезий-137. Это, во многом определяется различиями

механизмов поглощения. Ионообменный механизм преобладает для радионуклидов стронция, которые обмениваются со стабильным стронцием и кальцием почвенного поглощающего комплекса. Для редкоземельных элементов, а также радионуклидов циркония, рутения, цезия, ионообменный механизм имеет второстепенное значение.

Редкоземельные элементы, как правило, образуют труднорастворимые гуматы, фосфаты, карбонаты сульфаты, которые, отличаясь меньшей растворимостью, чем соответствующие соединения кальция, тем не менее, легко его замещают. Замещение преобладает и при поглощении цезия-137, который замещает калий в кристаллических решетках глинистых минералов.

На интенсивность и полноту поглощения радионуклидов, а также прочность их закрепления в твердой фазе почвы существенное влияние оказывает реакция среды, ее кислотность (рН). Независимо оттого, что является носителем кислотности - почвенный раствор или твердая фаза, при низких значениях рН среды отмечается менее прочная фиксация радионуклидов в почве. В этом отношении кислые почвы значительно менее способны к сорбции, чем почвы с нейтральной реакцией.

Радионуклиды, как правило, находятся в умытрамалом количестве. Например, содержание стронция-90 глобальных выпадений на поверхности почвы в среднем равно 10 мКи/км<sup>2</sup> (примерно в 10<sup>11</sup> раз ниже содержания в почве стабильного стронция).

При плотности загрязнения 1 Ки/км<sup>2</sup> массовая концентрация радионуклидов в пахотном слое почвы составляет: стронций-90 – 2,4·10<sup>-12</sup> %, цезий-137 – 3,9·10<sup>-12</sup> %, цирконий-95 - 1,6·10<sup>-14</sup> %. Исключение составляет небольшая группа радионуклидов с периодом полураспада в десятки-сотни миллионов лет и более, например, тяжелые естественные радионуклиды уран-238 и торий-232, массовая концентрация которых в почве составляет соответственно 3·10<sup>-4</sup> - 4·10<sup>-4</sup> % (активность 37,5 - 50 Бк/кг почвы и 16,4 - 36,9 Бк/кг соответственно). Очень низкая концентрация искусственных и естественных радионуклидов в почве и в почвенных растворах обуславливает существенную зависимость поведения радионуклидов в почве от концентрации и свойств их изотопных и неизотопных носителей. Так, перемещающийся в почве стронций-90 распределяется между обменным кальцием и кальцием, находящимся в почвенном растворе. В обоих случаях кальций выполняет функцию неизотопного носителя, при этом, чем больше обменного кальция в почве, тем больше задерживается в нем стронция-90, а чем больше кальция в растворе, тем больше стронция-90 остается в нем.

Скорость поглощения радионуклидов почвой зависит, прежде всего, от их растворимости. Водорастворимые формы радионуклидов легче взаимодействуют с

почвенным поглощающим комплексом, чем малорастворимые. В составе глобальных выпадений доля растворимой фракции составляет: стронций-90 – 30-90 %, цезий-137 – 30-80 %, церий-144 – 4-40 %, цирконий-95 + ниобий-95 – 60-90 %.

Фиксация радиоизотопов стронция различными типами почвы в среднем равна 80 -90 %, однако они сравнительно легко десорбируются под действием нейтральных солей. Активно взаимодействует с твердой фазой радионуклид цезия, задерживаясь на ней на 93 - 95 %. Однако в отличие от стронция цезий десорбируется значительно хуже.

Поглощение почвой радионуклидов препятствует их миграции вниз по профилю почвы, проникновению в грунтовые воды и, в конечном счете, определяет их аккумуляцию в верхних почвенных горизонтах. Так, на целинных участках, естественных лугах и пастбищах радионуклиды задерживаются в самом верхнем слое (0 - 5 см). После обработки почвы радионуклиды находятся преимущественно в пахотном слое.

Процесс поглощения радионуклидов почвой имеет двоякое значение: с одной стороны, снижается уровень их поступления в растения, с другой - накопление поглощенных радионуклидов в верхних слоях почвы (слое наибольшего распространения корней растений) повышает их доступность для растений. Следовательно, способствует большему накоплению радионуклидов в растительной массе, чем при их свободном передвижении в более глубокие горизонты.

Особое место в радиоактивном загрязнении почвы занимают трансурановые элементы - плутоний, америций, кюрий, нептуний. Они имеют периоды полураспада до тысяч и десятков тысяч лет и поэтому являются источниками практически вечного загрязнения для человечества. Трансурановые элементы не имеют стабильных аналогов в природе, что определяет своеобразие их поведения. Плутоний относится к химическим элементам с малой подвижностью в почве, где он медленно перемещается вглубь в основном за счет диффузии. Например, скорость миграции диоксида плутония в почве составляет примерно 0,8 см/год, при этом он передвигается в почве приблизительно в 100 раз быстрее, чем нитрат плутония. Незначительная часть плутония (тысячные доли процента), содержащегося в почве, усваивается растениями, при этом основное количество плутония задерживается в корнях и только незначительная часть переходит в наземную часть растений. В поверхностных слоях почвы и донных отложениях содержится более 99 % поступившего в биосферу плутония; в биологических компонентах экосистем находится соответственно менее 1 % плутония, большая часть которого связывается растениями.

Основной фактор, влияющий на поведение в почве америция и кюрия, - гидролиз. Поскольку гидроксиды америция и кюрия обладают более высокой растворимостью по



сравнению с гидроксидами плутония, они характеризуются более высокой подвижностью в почве и доступны для растений.

Поведение нептуния в почве наименее изучено. Известно, что его соединения отличаются наибольшей растворимостью среди всех трансурановых элементов и наиболее доступны для биоты.

В целом поведение всех радионуклидов в почве подчинено одним и тем же закономерностям, описанным выше. Однако есть особенности отличающие поведение радионуклидов поступивших в почву в виде аэрозольных выпадений или в составе жидких отходов. В первом случае радионуклиды в виде субмикронных частиц попадают в природную среду и включаются в существующие геохимические циклы. Во втором случае в почву поступает большое количество разнообразных веществ, резко меняющих химические и физико-химические условия среды, и миграция радионуклидов обуславливается обстановкой, сложившейся в итоге взаимодействия загрязняющих веществ с природной средой.

### **Радиоактивность растительного и животного мира**

Радиоактивность растительного и животного мира обусловлена практически всеми радиоактивными изотопами, которые встречаются в природе. Их можно условно разделить на две группы. К первой группе сравнительно малочисленной следует отнести калий-40, углерод-14, тритий, которые находятся в смеси со стабильными изотопами, активно участвующими в обмене веществ и обеспечивающих функционирование всех органов и систем организмов живой материи. В связи с этим уровень содержания этой группы изотопов в организмах зависит от степени накопления стабильных элементов. Например, в горохе содержится 0,9 % калия, а в сливочном масле - 0,014 %, поэтому удельная активность гороха за счет калия-40 равна 274 Бк/кг, а сливочного масла 3,7 Бк/кг.

Другие радиоактивные изотопы, такие как радий-226, уран-238, торий-232, свинец-210, полоний-210, можно отнести в группу, значимость которой в обменных процессах изучена недостаточно.

Результаты многих исследований показывают, что уровень содержания изотопов в растительных и животных организмах зависит от концентрации их в окружающей среде. Так, в золе растений, выращенных на обычных почвах, содержание урана в среднем составляет  $3 \cdot 10^{-4}$  г/кг, а в золе растений, произрастающих на обогащенных ураном почвах, -  $2 \cdot 10^{-3}$  г/кг. Необходимо отметить, что относительная эффективность накопления радиоактивных изотопов этой группы при резком увеличении содержания их во внешней среде снижается.

Из первой группы изотопов по величине создаваемой активности главное место занимает изотоп калия -  $^{40}\text{K}$ . Количество калия в растительных организмах по его содержанию в земной коре (на единицу массы) в 3 - 10 раз меньше. Еще меньше содержание калия в организме животных в 10 - 15 раз по сравнению с земными породами. Следовательно, содержание калия-40 в растениях выше, чем у животных организмов (табл. 15)

Таблица 15

Удельная активность  $^{40}\text{K}$  в продуктах растительного и животного происхождения

Продукт	Удельная активность, Бк/кг	Продукт	Удельная активность, Бк/кг
Пшеница	154	Лимон	41
Рожь	176	Клюква	44,4
Горох	274	Говядина	84
Крупа	41	Свинина	33,3
(гречка)	130	Рыба	77,7
Картофель	84	Икра рыбы	127
Морковь	44,4	Молоко коровье	44,4
Лук	100	Масло	3,7
Огурцы	0,34	сливочное	

Радиоактивность биомассы по углероду-14 по отношению к калию-40 на порядок меньше, а активность трития совсем ничтожна.

Основными изотопами второй группы, содержащиеся в растениях и животных, являются изотопы радия, урана, тория, свинец -210, и полоний-210. Удельная активность свинца-210 и полония-210 в растительной пище составляет 0,02 – 0,37 Бк/кг. Различия в уровнях содержания указанных нуклидов в продуктах растительного происхождения обусловлены разной сорбционной способностью растений. В продуктах питания животного происхождения (молоко) удельная активность свинца-210 колеблется в пределах 13,7 мБк/кг – 0,18 Бк/кг, полония-210 от 3,33 до 0,13 Бк/кг. В среднесуточном рационе жителя средних широт России содержится около 0,22 Бк свинца-210 и 0,16 Бк полония-210.

Содержание радия в основных продуктах питания растительного и животного происхождения представлено в таблице 16.

Суммарная радиоактивность растений и тканей животных за счет альфа-излучателей составляет величину порядка 0,37 Бк/кг и 0,037 Бк/кг соответственно.

Таким образом, основным источником поступления в организм естественных радиоактивных веществ является рацион, преобладающее значение в котором являются продукты растительного происхождения.

Таблица 16

Содержание радия в продуктах питания

Продукт	Содержания радия, сБк/кг	Продукт	Содержания радия, сБк/кг
Пшеница	7,4 – 9,6	Говядина	3,0 – 7,4
Горох	30 – 90	Рыба	1,5 – 2,7
Картофель	2,5 – 5,0	Молоко	0,01 – 1,0
Морковь	6,0 – 25,6	Яйца	11,0 – 33,0
Яблоки	0,74 – 3,3	Масло сливочное	0,37 - 11

**Радиоактивность тела человека**

Радиоактивность тела человека обусловлена присутствием всех радиоактивных изотопов, встречающихся в биосфере. Примерное содержание наиболее распространенных радиоактивных веществ в теле человека отображено в таблице 17.

Таблица 17

Содержание естественных радиоизотопов в теле человека

Радиоактивный изотоп	Содержание радиоизотопа без стабильного носителя, г	Радиоактивность, Бк
Калий-40	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$22,2 \cdot 10^3$
Углерод-14	$2 \cdot 10^{-2}$	$33 \cdot 10^2$
Рубидий-87	$7 \cdot 10^{-3}$	17
Тритий	$8 \cdot 10^{-15}$	2,8
Уран-235	$5 \cdot 10^{-6}$	0,4
Торий-232	$7 \cdot 10^{-5}$	0,3
Уран-238	$7 \cdot 10^{-4}$	8,9

При оценке содержания радиоактивных веществ в отдельных органах и системах тела человека необходимо рассмотреть в первую очередь радиоактивность, обусловленную присутствием изотопов, которые обязательно входят в состав живых структур и без которых невозможно существование организма. К этой группе относятся калий, углерод и водород.

Суммарное содержание калия в организме взрослого человека (масса тела 70 кг) составляет 0,19 % (130 г). Особенно богаты калием ткани и органы, обладающие высокой функциональной активностью. К их числу относятся скелетная мускулатура,

нервная ткань, сердце, печень, селезенка и др. Основным депо калия в организме является мышечная ткань. Ввиду того, что  $^{40}\text{K}$  встречается в природе в смеси со стабильными изотопами в количестве 0,0119 %, удельная радиоактивность органов и тканей и тела человека по  $^{40}\text{K}$  определяется содержанием стабильного изотопа (табл. 18).

Таблица 18

Содержание калия с  $^{40}\text{K}$  в отдельных органах и тканях человека

Орган, ткань	Содержание, мг %	Удельная радиоактивность Бк/кг
Мышцы	360	107
Головной мозг	330	89
Печень	215	63
Легкие	150	44
Жировая ткань	60	18,5
Костная ткань	61	18,5

Как показали результаты многих исследований, содержание калия, а следовательно и  $^{40}\text{K}$ , в организме человека зависит от пола, возраста, массы тела, характера мышечной деятельности и т. д. У мужчин содержание калия в мышцах обычно выше, чем у женщин; большие концентрации калия обнаруживаются у лиц, выполняющих тяжелую физическую работу. Дистрофические изменения в мягких тканях при старении организма сопровождается снижением уровня калия. Таким образом, отклонения концентрации калия в органах и системах отдельных индивидуумов по сравнению с указанными в табл. 15 данными могут быть довольно значительными и достигать 150 - 200% и выше.

Общее содержание углерода в теле взрослого человека достигает 18 %, т. е. около 12,6 кг. Учитывая равномерное распределение углерода в тканях, можно считать, что удельная радиоактивность их по  $^{14}\text{C}$  составляет 52 Бк/кг.

Количество трития в организме практически постоянно и определяется содержанием стабильного изотопа (около 10,2% в мышцах и 6,4% в костях). Удельная активность мягких тканей тела человека за счет  $^3\text{H}$  составляет 0,55 Бк/кг, а костей 0,34 Бк/кг.

Следует указать, что активность тела человека, обусловленная присутствием  $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$  и  $^3\text{H}$ , в первую очередь зависит от количества стабильных элементов, уровень содержания которых диктуется требованиями постоянства внутренней среды, определяемой функциональным состоянием организма. Возможные значительные колебания

радиоактивности пищевых рационов за счет указанных изотопов в данном случае не имеют существенного значения.

Биологическая роль присутствующих в организме в ничтожно малых количествах радиоактивных изотопов условно относимых ко второй группе, до сих пор неизвестна. Избирательное накопление в отдельных органах системах этой группы изотопов или их равномерное распределение обусловлено химическими свойствами, близкими к свойствам биологически необходимых стабильных химических элементов. Из радиоактивных веществ этой группы, содержащихся в организме, наиболее глубоко изучен радий. Этот изотоп, подобно кальцию и другим остеотропным элементам, накапливается преимущественно в костной ткани. Содержания радия в отдельных тканях и органах представлены в табл. 19

Таблица 19

Содержание радия в отдельных тканях и органах в теле человека  
(по Л. А. Перцову)

Ткань, орган	Удельная радиоактивность, сБк/кг
Костная ткань	19,9
Печень	7,4
Легкие	4,4
Мышцы	5,2
Почки	3,3
Яичники	1,1

Количество радия в организме в целом по оценкам различных авторов находится в пределах от  $0,48 \cdot 10^{-10}$  г до  $4,8 \cdot 10^{-10}$  г. Б. Раевский рассчитывал, что в том случае если в пищевом рационе будет содержаться 12,5 сБк радия и в воде 1 сБк, накопление радия в организме к 70 годам достигнет 4,1 Бк.

Основная часть  $^{210}\text{Pb}$  (до 70%) содержится в скелете. При относительно большом его периоде полувыведения, равном 2000 сут, возможно накопление равновесного количества  $^{210}\text{Pb}$ . Удельная активность  $^{210}\text{Pb}$  в костной ткани составляет 15 Бк/кг, в мягких тканях – 6,4 Бк/кг.

Общее содержание урана в организме невелико - порядка  $1 \cdot 10^{-10}$  г/г. На долю тория и его  $\alpha$ - активных дочерних продуктов приходится до 40% суммарной активности тела человека.

Приведенные выше уровни содержания в организме человека радия, урана и, других радиоактивных изотопов относимых ко второй группе, носят ориентировочный

характер, и представить удельную активность органов и тканей в средних величинах в этом случае весьма затруднительно. Это связано с тем, что на степень радиоактивности отдельных органов и тканей тела человека, с одной стороны, влияет скорость обменных процессов и функциональное состояние организма, а с другой содержание этой группы изотопов в рационе. При постоянном одинаковом поступлении с рационом радиоактивных веществ, устанавливается равновесие между поступлением и выведением их из организма. При этом в отдельных органах и тканях создается равновесная концентрация. При увеличении содержания изотопов в рационе равновесная концентрация возрастает. Если учесть, что количество радиоактивных веществ неодинаково не только в различных пищевых продуктах, но и в одном и том же продукте, выращенном в разных геохимических провинциях, становится понятным значение в содержании этой группы изотопов этнических и экономических особенностей питания населения. В качестве примера можно рассмотреть радиоэкологическую цепочку лишайник - северный олень - человек. Значительная сорбционная емкость лишайников и длительный период жизни (до 300 лет) приводят к существенному накоплению  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$  в них - до 2,59 сБк/кг воздушно-сухой массы (в среднем). Уровни накопления  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$  в организме северного оленя существенно зависят от сезона выпаса животного. Максимальное содержание этих нуклидов отмечается в весенний период года (кормовая база - лишайник) и достигает 1,7 сБк (460 пКи/кг) сырого мяса, в летний период (кормовая база - однолетние травы) удельная активность снижается примерно в 5 раз (такая зависимость для  $^{210}\text{Pb}$  отсутствует). Поступление указанных радиоизотопов в организм человека при условии равновесия между поступлением и выведением радионуклидов (для группы коренных жителей-оленьеводов к концу зимы составляет более 90%) позволяет оценить поступление в организм по выделениям. По данным Р. В. Рамзаева, содержание  $^{210}\text{Pb}$  в суточных выделениях составляет  $0,94 \pm 0,4$  Бк/кал и  $0,2 \pm 0,04$  Бк/моча при  $^{210}\text{Po}$   $^{210}\text{Pb}$  равных 2 и 0,3 соответственно, что отвечает эквивалентному содержанию этих нуклидов в 250 – 300 мяса оленины. При этом наблюдается накопление  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$  в костной ткани до 4,4 – 4,8 Бк/кг, превышающее их содержание в 10 и более раз по сравнению с лицами прочих профессий.

Из представленных материалов видно, что основным источником поступления радиоактивных элементов, поступающих в организм человека, являются пищевые продукты. Вода в этом отношении имеет второстепенное значение. И только в случае повышения активности по радио до 3,7 сБк/л и более обнаруживается ее определенная роль в формировании радиоактивности человека.

Дозы облучения от естественных радионуклидов, находящихся в организме, сравнительно невелика. Внутреннее облучение большинства органов и тканей обусловлено наличием калия-40 годовая поглощенная доза, от которого в отдельных органах варьирует от 15 до 27 мрад, тогда как от других, находящихся в организме естественных радионуклидов поглощенная доза обычно составляет десятые - сотые доли мрад/год.

Таким образом, радиоактивные вещества рассеяны в биосфере и повсеместно присутствуют в земных породах, в воде, воздухе, пищевых продуктах и теле человека. Важность этого явления в первую очередь обусловлена теми дозами фонового облучения, которому подвергается население нашей планеты.

### **Фоновое облучение человека**

Фоновое облучение организма человека в зависимости от источников ионизирующих излучений подразделяется на внешнее и внутреннее.

К источникам внешнего облучения относятся космические лучи, гамма-излучение радиоактивных веществ, содержащихся в горных породах, почве, строительных материалах, в воздухе. Бета-облучение в этом случае можно не учитывать, так как уровень ионизации воздуха за счет  $\beta$ -частиц не высок, эффективный телесный угол облучения тела менее  $2\pi$ , а органические вещества на поверхности земли и также облицовочные материалы в помещениях, обладая малой удельной  $\beta$ -активностью, поглощают  $\beta$ -потoki от строительных конструкций.

Представление о величине дозы, за счет внешнего гамма-облучения, для населения, проживающего в центральных областях Европейской части территории России, можно получить из таблицы 20.

Таблица 20

Мощность дозы  $\gamma$ -облучения на территории центральных областей  
( по Л. А. Перцову).

Элемент	Содержание элемента г/г	Мощность дозы, мкГр/год
Уран	$2,6 - 4,0 \cdot 10^{-6}$	165 – 263
Торий	$0,5 - 1,2 \cdot 10^{-5}$	15 – 37
Радий	$0,8 - 1,1 \cdot 10^{12}$	153 – 211
Калий	$0,43 - 2,58 \cdot 10^{-2}$	60 - 354

Как видно из таблицы, колебания мощности  $\gamma$ -излучения за счет отдельных радиоактивных изотопов даже на сравнительно однотипной территории весьма значительны. Существенное влияние на интенсивность  $\gamma$ -потоков от пород и почвы оказывает снежный покров. Мощность  $\gamma$ -излучения от радиоактивных веществ,

находящихся в воде морей и океанов, достигает 0,43 мкГр/год. В районах с повышенным количеством радиоактивных элементов (некоторые зоны в Бразилии, Индии, Франции) наблюдается особенно высокая активность  $\gamma$ -радиации. Так, в районе монацитных песков Бразилии мощность  $\gamma$ -излучения достигает 10 мГр/год, в Индии от 1,31 до 28,14 мГр/год, в горных районах Франции от 1,8 до 3,5 мГр/год.

Особый интерес представляют уровни  $\gamma$ -фона в жилых зданиях. С одной стороны, в помещениях изменяется геометрия облучения тела человека (на улице она приближается к  $2\pi$ , в помещениях -  $4\pi$ ) с другой - мощность  $\gamma$ -излучения зависит от содержания радиоактивных веществ в строительных материалах. Наименьший  $\gamma$ -фон отмечается в зданиях, построенных из дерева, - до 0,5 мГр/год. Дозы в кирпичных зданиях - до 1 мГр/год, и железобетонных - до 1,7 мГр/год.

При оценке дозы, создаваемой космическим фоном, во-первых, исходят из того, что космические лучи обладают высокой степенью «жесткости», поэтому практически поглощенная доза в любых тканях и органах тела человека должна быть одинаковой. Во-вторых, не учитываются флуктуации фона за счет разного уровня солнечной активности, а также его изменения в зависимости от широты. Для расчета дозы, создаваемой космической радиацией, необходимо иметь данные об ионизации воздуха за счет этой компоненты фонового облучения. Наиболее достоверной величиной ионизации воздуха для средних широт считается скорость ионизации, равная 1,94 пар ионов в 1 см<sup>3</sup>/с. Пользуясь этим значением, можно рассчитать поглощенную дозу, в тканях тела человека по формуле:

$$D_{\text{кос.}} = \frac{1,94 * 3,6 * 10^3 * 24 * 365 * 10^3}{2,06 * 10^9 * 1,07} = 28 \text{ мрад/год (0,28 мГр/год)},$$

где  $D_{\text{к}}$  – поглощенная доза за счет космического излучения;

1,94 – число пар ионов, возникающих в 1 см<sup>3</sup> воздуха за счет космических лучей;

$3,6 \cdot 10^3$  – число секунд в 1 ч;

24 – число часов в 1 сут;

$2,06 \cdot 10^9$  – число пар ионов, возникающих при дозе 1 Р;

$10^3$  – коэффициент перевода дозы из рентген в рад.

Таким образом, 0,28 мГр/год (28 мрад/год) является средней дозой, которую получает население планеты за счет космического излучения. При оценке возможного



биологического эффекта этого вида ионизирующего излучения необходимо учитывать ОБЭ для каждой составляющей космических лучей.

Значительная часть суммарной дозы внешнего облучения человека, обусловленной природными источниками радиации, создается за счет  $\gamma$ -излучения радиоактивных веществ, находящихся в поверхностном слое пород и почвы литосферы, вклад отдельных радионуклидов в эту дозу зависит от их концентрации. Интенсивность  $\gamma$ -излучения над породами и почвой может быть рассчитана по предыдущей формуле на основании знания скорости ионизации воздуха за счет отдельных радиоактивных изотопов. Скорость ионизации воздуха при известном содержании основных  $\gamma$ -излучающих радиоактивных веществ находят по формулам Б. Хульквиста, правомочность которых подтверждена натурными наблюдениями:

$$I_{Ra} = 1,26 \cdot 10^{12} \cdot S_{Ra}$$

$$I_U = 4,4 \cdot 10^5 \cdot S_U$$

$$I_{Th} = 2,1 \cdot 10^5 \cdot S_{Th}$$

$$I_K = 91 \cdot S_K$$

где  $I_{Ra}$ ,  $I_U$ ,  $I_{Th}$ ,  $I_K$  – интенсивность образования пар ионов/(см<sup>3</sup>·с) соответствующего элемента;

$S$  – концентрация соответствующего элемента в граммах на 1 г породы или почвы.

Результаты расчетов интенсивности  $\gamma$ -излучения представлены в таблице 21.

Таблица 21

Мощность дозы внешнего  $\gamma$ -излучения радия, урана, тория, калия, содержащихся в породах (по Л. А. Перцову)

Породы	Мощность дозы, мкГр/год			
	Радий-226	Уран-238	Торий-232	Калий-40
Магматические:				
кислые	257	263	409	352
средние	97	92	137	282
основные	73	72	124	191
ультраосновные	38	39	62	54
Осадочные:				
песчаники	130	77	148	146
сланцы	220	77	306	360
известняки	77	84	40	360

Принимая во внимание, что коэффициент среднего времени пребывания человека вне помещений равен 0,2, можно рассчитать, что годовая эффективная эквивалентная доза за счет  $\gamma$ -излучения земного происхождения вне помещений составляет  $6 \cdot 10^{-5}$  Зв. Учитывая соотношения имеющихся на земном шаре деревянных, кирпичных зданий и зданий из бетона и, оценивая коэффициент пребывания человека в помещениях – 0,8 НКАДР при ООН определил, что усредненная эффективная эквивалентная доза внутри помещений по всему земному шару составляет  $2,9 \cdot 10^{-4}$  Зв.

Излучение естественных радиоактивных веществ, содержащихся в атмосфере, вызывает ионизацию воздуха примерно на два порядка меньше по сравнению с  $\gamma$ -излучением пород и почвы, поэтому оно имеет ничтожный вклад в суммарный эффект.

Внутреннее облучение организма человека создается за счет  $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и других радиоактивных элементов, содержащихся в организме. При вычислении мощности дозы, создаваемой тем или иным изотопом, исходят из средних количеств содержания их в теле человека «стандартного» человека. Радионуклиды земного происхождения, попадающие в организм, создают годовую эффективную эквивалентную дозу на уровне 1400 мкЗв, из которых 180 мкЗв приходится на  $^{40}\text{K}$ , 1200 мкЗв – за счет изотопов  $^{226}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Th}$ , а также короткоживущих продуктов их распада, находящиеся преимущественно в воздухе помещений вследствие поступления родона и торона из стройматериалов и грунта подвальных помещений. Уран-238 поступает в основном с пищей, существенно меньше – с водой. Годовое поступление его в организм человека оставляет около 5 Бк. Концентрация  $^{238}\text{U}$  в костной ткани находится на уровне 0,1 – 0,2 Бк/кг. Годовые поглощенные дозы от урана составляют  $1,7 \cdot 10^{-6}$  Гр. Торий-232 из-за низкого всасывания в желудочно-кишечном тракте проникает в организм преимущественно с вдыхаемым воздухом. Годовое поступление его составляет примерно 10 мБк. Являясь остеотропным элементом и накапливаясь в скелете,  $^{232}\text{Th}$  создает дозы порядка  $7 \cdot 10^{-6}$  Гр в год. Годовая эффективная эквивалентная доза за счет  $^{226}\text{Ra}$  в регионах с обычным ЕРФ невелика и составляет около 6 – 7 мкЗ ( табл. 22).

Таблица 22

Годовые эффективные эквивалентные дозы за счет природных источников ионизирующего излучения в регионах с нормальным РФ (зона умеренного климата)

Природные ИИИ	Годовая эффективная эквивалентная доза облучения, мкЗв		
	Доза за счет внешнего облучения	Доза за счет внутреннего облучения	Суммарная доза
Космическое	300	Отсутствует	300

излучение Космогенные нуклиды Радионуклиды земного происхождения:	Отсутствует	15	15
калий-40	120	180	300
рубидий-87	Отсутствует	6	6
ряд урана-238	90	1150	1240
ряд тория-232	140	230	380
суммарно(округленно)	650	1600	2250

### Радиационные источники загрязнения окружающей среды

По потенциальной опасности возможного поступления радиоактивных загрязнений в биосферу все источники могут быть условно определены на несколько групп. К ним относятся:

- испытания или вероятное применение ядерного оружия;
- предприятия по добыче, переработке и получению искусственных радиоактивных изотопов;
- учреждения, предприятия и лаборатории, использующие радиоактивные вещества в технологии производственных процессов;
- места захоронения радиоактивных отходов;
- ядерные реакторы разных типов, используемые на АЭС и вероятность аварий на них.

*Ядерный взрыв.* Ядерные взрывы осуществляются вследствие двух типов превращений. Первый в результате деления природного урана-235 или плутония-239, получаемого в реакторе из урана-238, т.е. атомные взрывы атомной бомбы. Второй тип превращения основан на принципе синтеза гелия из двух легких элементов водорода и трития. Взрывы, происходящие по типу синтеза, называют термоядерные, а бомбы водородные, поскольку для реакции синтеза необходимы условия высоких температур – в несколько миллионов градусов достигаемых при взрыве ядерного горючего в виде урана или плутония, т.е. атомной бомбы.

При ядерных взрывах образуется около 250 изотопов 35 элементов из них 225 радиоактивных, как непосредственно осколков деления ядер тяжелых элементов, так и продуктов их распада с различным периодом полураспада от нескольких секунд до нескольких миллионов лет. По характеру излучения почти все радиоактивные изотопы деления относятся к бета- или к бета- и гамма- излучателям. Помимо радиационных

продуктов деления при атомном взрыве в число радионуклидов входит и непрореагировавшая часть ядерного горючего, которая является альфа-излучателем, считается, что во время взрыва в реакцию деления вступает примерно 20-30 % ядер тяжелых элементов. Активность этих альфа-излучателей по сравнению с активностью продуктов деления при взрыве меньшая.

Наряду с продуктами распада ядерного горючего при термоядерных взрывах образуются изотопы углерода-14, трития, берилия-7 (наведенная радиоактивность). Наведенная радиоактивность возникает при захвате нейтронов деления и медленных нейтронов ядрами атомов, входящих в состав конструкции взрывного устройства, воздуха, почвы или воды. При этом образуются такие радиоактивные изотопы как натрий-24, магний-27, кремний-31 и др.

Среди множества радионуклидов, возникающих при взрыве ядерных и термоядерных устройств, основную радиационную опасность создают следующие радионуклиды (табл. 23).

Таблица 23

Наиболее значимые для человека радионуклиды в радиоактивных осадках

Нуклид	Выход на 1 Мт деления или синтеза, Бк	Период полураспада	Основной вид облучения	Основной критический орган	Период биологического полувыведения, сут.
$^3\text{H}$	$1,74 \cdot 10^{16}$	12,34 года	Внутреннее	Все тело	12
$^{14}\text{C}$	$8,1 \cdot 10^{13}$	5730 лет	— «—	Жировая ткань	10
$^{89}\text{Sr}$	$6,3 \cdot 10^{17}$	51 сут	— «—	Кость	$1,8 \cdot 10^4$
$^{90}\text{Sr}$	$3,7 \cdot 10^{15}$	28,8 года	— «—	— «—	$1,8 \cdot 10^5$
$^{95}\text{Zr}$	$4,6 \cdot 10^{17}$	65 сут	Внешнее	Все тело	450
$^{95}\text{Nb}$	-	35,15 сут	— «—	— «—	760
$^{106}\text{Ru}$	-	1 год	— «—	— «—	10,4
$^{131}\text{I}$	-	8,06 сут	Внешнее и внутреннее	Щитовидная железа	-
$^{137}\text{Cs}$	$6,3 \cdot 10^{15}$	30 лет	— «—	Все тело	70
$^{140}\text{Ba}$	$42,2 \cdot 10^{17}$	12,74 сут	— «—	Кость, ЖКТ	65
$^{144}\text{Ce}$	$13,5 \cdot 10^{16}$	284,3	— «—	Все тело	-
$^{239}\text{Pu}$	$13,3 \cdot 10^{13}$	$2,44 \cdot 10^4$ лет	Внутреннее	Кость	$7,3 \cdot 10^4$

В настоящее время запрещены испытания ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве, подводой и под землей. С точки зрения опасности загрязнения биосферы

продуктами ядерных взрывов, наиболее важное значение имеют наземные взрывы ядерных бомб.

Высота подъема огненного шара и размеры образующегося грибовидного облака определяются мощностью взрыва и метеорологическими условиями. По мере подъема происходит охлаждение огненного шара, он принимает форму гриба, ножка которого состоит из крупных частиц земли, а шляпка представляет собой расширенное облако. При охлаждении шара происходит конденсация и образование радиоактивных аэрозолей и формирование радиоактивных осадков.

Радиоактивные осадки подразделяются на локальные или местные, и тропосферные и стратосферные или глобальные. Локальные осадки выпадают в течение 24 часов вблизи ядерного взрыва. Величина частиц формирующие эти осадки колеблется от 0,1 мм до 1 см.

Тропосферные осадки состоят из частиц размером 10-100 мкм. Они попадают в тропосферу (нижнюю часть атмосферы) на высоту 10-18 км, подхватываются воздушными течениями и выпадают постепенно с дождями, туманами на поверхность Земли, загрязняя почву, растения. Выпадения этих осадков происходит в течение 20-30 суток. Эти же частицы с наибольшей вероятностью проникают внутрь организма ингаляционным путем.

Стратосферные осадки формируются частицами менее 10 мкм. Загрязнение территории из стратосферного резервуара определяют как загрязнение за счет глобальных выпадений. Выпадение осадков из стратосферы происходит медленно, время пребывания их на высоте 20 - 25 км варьирует в пределах от нескольких месяцев до нескольких лет. В связи с длительностью пребывания радионуклидов в атмосфере короткоживущие и средне живущие нуклиды полностью распадаются и основное радиологическое значение приобретают долгоживущие изотопы стронция-90 и цезия-137, которые именуются «глобальными».

При выпадении радиоактивных осадков на местность происходит загрязнение верхнего слоя почвы. Оно существует относительно недолго. Постепенно, в течении нескольких недель, под влиянием различных процессов радиоактивные продукты взрыва проникают в глубь почвы, в результате происходит объемное загрязнение почвы глубиной в несколько сантиметров (5 - 6см).

В зоне следа радиоактивного облака растения и животные подвергаются воздействию, прежде всего, внешнего ионизирующего излучения. Оно исходит от радионуклидов, выпавших на землю, а также осевших на растения или кожу животных. Основной вклад в поглощенную дозу вносят гамма-излучение у животных и бета-излучение у растений. Основная доза облучения у растений и животных на следе радиоактивного облака

формируется в первые 4 дня. При этом величина поглощенной дозы определяется, прежде всего, мощностью дозы излучения. Соответственно дозам излучения при взрыве заряда мощностью в 1Мт и скорости ветра 50км/ч, вся территория радиоактивного следа условно делится на 4 зоны.

А – зона умеренного загрязнения покрывает расстояние до 400 км, экспозиционная доза гамма-излучения в этой зоне составляет 40-440 Р, а ее мощность 8-80 Р/ч.

Б – зона сильного загрязнения покрывает расстояние от эпицентра взрыва в 170 км, экспозиционная доза гамма-излучения в этой зоне составляет 400-1200 Р, а ее мощность 80-240р/ч.

В – зона опасного загрязнения покрывает расстояние в пределах 110 км от места взрыва, экспозиционная доза гамма-излучения в этой зоне составляет 1200-4000 Р, а ее мощность 240 - 800 Р/ч.

Г - зона чрезвычайно опасного загрязнения находится в пределах 100 км от эпицентра взрыва, уровень гамма-излучения в этой зоне составляет более 4000 Р при мощности дозы более 800 Р/ч.

При поступлении в атмосферу радиоактивных продуктов, возникающих при испытании ядерного оружия, отмечаются некоторые общие закономерности в их поведении. Значительная часть возникающих радионуклидов увлекается в верхние слои тропосферы и стратосферы. Поэтому их поведение в этом случае в значительной степени обусловлено особенностями метеорологических процессов, протекающих в атмосфере всей планеты.

При взрыве ядерных устройств реакции деления и синтеза практически протекают за  $10^{-7}$  с. При этом создается такая высокая температура, что разрушаются все химические связи, происходит частичная, а у некоторых атомов и полная ионизация. Все устройство целиком превращается в газ, состоящий из нейтральных и ионизированных атомов. В этой стадии возникает быстро расширяющийся огненный шар. Из-за высокой температуры плотность газа в огненном шаре значительно меньше плотности атмосферного воздуха. Это ведет к быстрому подъему огненного шара до такой высоты, где его плотность сравнивается с плотностью окружающего воздуха. Быстрый подъем шара создает на его пути область разрежения, в которую с большой скоростью перемещаются более плотные массы воздуха. Образуется мощный восходящий поток в виде вертикального столба - ножки гриба. Через несколько миллисекунд после детонации наступает стадия особенно сильной генерации светового и теплового излучений, ведущая к потере энергии. По этой причине и вследствие

почти адиабатического расширения огненного шара температура его снижается и начинается конденсация содержащихся в нем паров. При конденсации образуются радиоактивные аэрозоли различного размера. Так формируется радиоактивное облако, образующее шляпку гриба. Ход этого процесса, химический состав и структура образующихся продуктов значительной степени зависят от условий, в которых произведен взрыв, и от вида и мощности взрываемого устройства.

Объем облака составляет примерно  $100 \text{ км}^3$  на 1000 т тротилового эквивалента, или  $5000 \text{ км}^3$  на 1 Мт тротилового эквивалента.

Крупные частицы под действием силы тяжести довольно быстро выпадают в районе взрыва, создавая местное, локальное загрязнение. Частицы микронного и субмикронного размера оседают медленно, оставаясь взвешенными в воздушных массах, входящих в состав облака. Выпадение этих частиц приводит к радиоактивному загрязнению в точках земного шара, удаленных на десятки тысяч километров от места испытаний, т. е. к глобальному загрязнению.

Распределение продуктов деления ядерных взрывов в значительной мере зависит от условий испытаний и мощности устройств. При взрывах мегатонного класса продукты деления распределяются следующим образом: при воздушных взрывах на большой высоте 90 % осколков увлекается в стратосферу, локальных загрязнений нет; при наземных взрывах 20 % попадает в стратосферу, 80% выпадает в районе взрыва. При взрывах над поверхностью моря 30 % попадает в стратосферу, 70% выпадает в виде местных осадков. При всех видах взрывов атомных зарядов килотонного класса вся активность остается в тропосфере или выпадает в виде местных осадков.

При попадании мелких радиоактивных аэрозолей в составе радиоактивного облака в тропосферу происходит их разбавление в результате диффузии, горизонтального размывания в направлении движения ветра и смещения воздушных струй по вертикали.

Сопоставление результатов исследований переноса радиоактивных аэрозолей с метеорологическими данными показало, что миграция радиоактивных аэрозолей в тропосфере идет в соответствии с законом перемещения воздушных масс. При этом скорость переноса вдоль параллели значительно больше, чем в меридиональном направлении, и прежде чем тропосфера очистится радиоактивных осколков, они успевают несколько раз обойти земной шар вдоль параллели. Распространение вдоль меридиана за это время происходит на  $10 - 20^0$  широты, на которой были проведены испытания. Насколько быстро переносятся в тропосфере радиоактивные частицы, можно проиллюстрировать следующие примерами: продукты взрыва, проведенного в штате

Невада (США) 7 марта 1955 г., через 5 дней выпали в значительном количестве в окрестностях Ленинграда. После взрыва 13 февраля 1960 г. в Сахаре радиоактивные продукты были обнаружены 17 февраля 1960 г в Крыму.

Расположение полосы максимальной загрязненности на широте проведенного испытания отмечается только в средних широтах. При испытаниях в зоне экватора полоса максимального тропосферного выпадения смещается от широты места взрыва в сторону полюсов. Был отмечен также переход продуктов ядерных взрывов в верхней тропосфере через зону экватора из северного полушария в южное.

Какие же процессы способствуют выпадению мельчайших радиоактивных аэрозолей? Гравитационное оседание частиц, создающих глобальное загрязнение, не имеет значения, поскольку оно проходит крайне медленно.

Выпадение мелких частиц радиоактивных аэрозолей из тропосферы на земную поверхность происходит в результате ряда иных процессов. К ним относятся прилипание частиц аэрозолей к поверхности наземных предметов и почве (при обтекании их приземным слоем воздуха), в первую очередь растительности. Коагуляции с частицами местной, нейтральной, нерадиоактивной пыли, захват аэрозолей элементами природных облаков (при их формировании). И вымывание аэрозолей при осадках (захват частиц падающими каплями).

Первые два процесса обуславливают так называемое сухое выпадение, другие связаны с атмосферными осадками.

Наблюдения за тропосферным переносом радиоактивных аэрозолей и их выпадением показали, что очищение тропосферного воздуха протекает в зависимости от метеорологических условий. Решающая роль принадлежит осадкам. В умеренных широтах, в среднем за год, за все дни с осадками выпадало в 9 раз больше радиоактивных продуктов, чем за все дни без осадков.

В засушливых районах за каждый день с дождем выпадало также большее количество радиоактивных продуктов, чем за один сухой день без осадков. Но так как в этих зонах дней с осадками обычно мало, на них приходилась меньшая доля годового выпадения, чем во влажных районах.

При выпадении радиоактивных продуктов в отсутствие атмосферных осадков главная роль принадлежит турбулентному перемешиванию воздушных масс, при котором имеет место постоянное обновление самого нижнего, прилегающего к земной поверхности слоя воздуха.



Сложное сочетание всех метеорологических факторов и уровней содержания радиоактивных осколков в атмосферном воздухе приводило к тому, что величина выпадений в одном и том же пункте в разные дни могла изменяться в тысячи раз.

Скорость очистки тропосферы от радиоактивных загрязнений при усреднении времени, необходимого для выпадения хорошо и слабо вымываемых осадками активных аэрозолей, носит экспоненциальный характер с периодом полуочищения 20 - 40 дней. С практической точки зрения самым важным является твердо установленный факт быстрой очистки тропосферы от основной части попавших в нее радиоактивных продуктов ядерных взрывов под действием атмосферных осадков.

Экспериментальные взрывы малой мощности, дававшие только тропосферные загрязнения, играли незначительную роль в глобальных выпадениях. Преобладающее значение в этом имели испытания устройств мегатонного класса, при которых основная масса радиоактивных осколков попадала в стратосферу.

При ядерных взрывах большой мощности мельчайшие радиоактивные аэрозоли в составе радиоактивного облака попадают в стратосферу. Облако захватывается стратосферными воздушными течениями и переносится в общем направлении вдоль параллели со скоростью около 100 км/ч, при этом оно вытягивается в направление переноса (скорость перемещения в меридиональном направлении во много раз меньше). Наряду с этим происходит диффузия облака в перпендикулярных переносу направлениях. Гравитационное оседание мелких аэрозолей происходит, как и в тропосфере, медленно. Так, например, на высоте 33 - 35 км скорость оседания частиц диаметром 10 мкм составляет 30 м/ч, или 250 км/год. Для частиц диаметром  $< 0,1$  мкм броуновское движение преобладает над седиментацией. На меньшей высоте скорость оседания частиц уменьшается за счет повышения плотности атмосферы. В результате для частиц разного размера имеется такой уровень, на котором процесс оседания становится малозначимым по сравнению со скоростью турбулентного движения воздуха. На этом уровне создается седиментационное равновесие, частицы оказываются надолго включенными в воздушные массы стратосферы.

Важное место в расслоении аэрозолей различного размера занимает солнечная радиация. При поглощении солнечного тепла пылинки увлекаются пузырьком теплого воздуха, окружающего нагретую пылинку, причем скорость их подъема тем больше, чем меньше размер пылинки. В ночное время это расслоение усиливается за счет быстрой седиментации крупных частиц. Влиянием лучистой энергии объясняется и то, что максимум концентрации радиоактивных аэрозолей в стратосфере экваториальных и умеренных широтах располагается на высоте 20 - 25 км, несмотря на то, что

первоначальный уровень стабилизации радиоактивных облаков находится иногда ниже, а иногда и значительно выше указанных высот. При этом продукты деления обнаруживаются в обоих полушариях с большей концентрацией над умеренными и высокими широтами, чем над экваториальной зоной. Концентрация этих продуктов в северном полушарии выше, чем в южном (т. е. имеется определенная зависимость от зоны наиболее интенсивных испытаний). Радиоактивные вещества могут удерживаться в стратосфере от нескольких месяцев до нескольких лет. За это время происходит распад короткоживущих изотопов, а количество долгоживущих элементов практически не изменяется (например,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ). Таким образом, стратосфера является своеобразным резервуаром для накопления долгоживущих осколков деления с периодом полуочищения от 7 месяцев до 1 года.

Выпадению радиоактивных веществ из стратосферы предшествует их переход из стратосферы в тропосферу. В настоящее время выдвинут ряд гипотез, которые пытаются объяснить механизмы перехода радиоактивных осколков из стратосферы в тропосферу на основании результатов оценки глобальных выпадений на территории нашей планеты с учетом сезонных колебаний и пр.

Какие же особенности отмечаются в картине глобальных выпадений? Глобальное радиоактивное загрязнение оказалось различным на разных широтах и примерно одинаковым вдоль каждой широтной полосы, за исключением особо засушливых зон и районов локального загрязнения. Распределение концентраций радиоактивных осколков в тропосфере, в частности в приземном слое воздуха, было довольно изменчиво. Однако, чаще всего, максимум приходился на 25 - 35° широты, причем в северном полушарии этот максимум, как правило, выше чем в южном.

Максимум распределения по земной поверхности выпавших долгоживущих изотопов приходился на широты 40 - 50°. Таким образом, отмечается смещение максимума выпадений по сравнению с максимумом загрязнения воздуха. По мнению многих исследователей, причина смещения состоит в том, что субтропический пояс 25 - 35° широты беден осадками. Более загрязненные воздушные массы на этих широтах из-за недостатка осадков дают меньшее выпадение, чем менее загрязненные в поясе 40 - 50°, где атмосфера обильно очищается осадками. Экваториальная зона, несмотря на обилие осадков в ней, имеет слабо загрязненные воздушные массы, и поэтому в этой зоне выпадения невелики.

Отмечаются значительные изменения в динамике глобальных выпадений также в зависимости от сезона года. Максимум выпадений в северном полушарии приходится на II квартал, а в южном - на IV, т. е. в обоих полушариях - на весну и начало лета.

Из всех гипотез, объясняющих причины распределения глобальных выпадений по широтам, а также и их зависимость от сезона года, представляет наибольший интерес гипотеза, разработанная советским ученым Д. Л. Симоненко, согласно которой, во время полярной зимы граница тропосферы в районе полюса опускается. В конце зимы и в начале весны граница тропосферы поднимается, и нижняя часть стратосферы вместе с присутствующими в ней радиоактивными аэрозолями оказывается включенной в тропосферу, и радиоактивные продукты выпадают при тропосферном переносе. При попадании радиоактивных осколков в стратосферу в высоких широтах, где в начале весеннего сезона благоприятные условия для перехода аэрозолей создаются только к следующему году.

При очистке околополярной тропосферы от радиоактивных аэрозолей создается градиент концентрации их, направленный от экватора к полюсу. Периодическое освещение и затемнение полярной стратосферы перемещает аэрозоли из экваториальной стратосферы в полярную и затем и в приполярную тропосферу. Поэтому широтное распределение радиоактивных выпадений и их сезонность объясняются перемещением воздушных масс в пределах тропосферы из полярных районов в умеренные широты, причем этот перенос происходит независимо географического расположения испытательных полигонов. Этот вывод автора подтвердили результаты исследований в 1965 г., когда максимум загрязнений от испытаний, проведенных в экваториальном районе северного полушария, был отмечен в северных и умеренных широтах.

Гипотеза освобождения стратосферы от радиоактивных веществ, высказанная группой отечественных ученых, работавших на борту экспедиционного судна «Витязь» с 6 октября 1958 г. по 28 апреля 1960 г., предполагает подъем воздушных масс в районе экватора с их проникновением в нижнюю часть стратосферы; из стратосферы эти воздушные массы опускаются в районе  $25 - 35^{\circ}$  Южного и Северного полушарий в результате натекания их на холодный клин полярного воздуха.

Наблюдаемую картину загрязнений пытаются также объяснить турбулентной диффузией на границе тропосферы и стратосферы. По этой гипотезе поступление продуктов взрывов должно быть более интенсивным там, где сильнее турбулентная диффузия. Зоной наибольшей стабильности в нижней части стратосферы является район экватора. Поэтому попавшие в стратосферу в районе экватора радиоактивные аэрозоли не могут выпадать в тех же широтах. Радиоактивные продукты с большой высоты над экватором путем турбулентной диффузии как бы скользят по наклонной плоскости, входят в тропосферу на уровне  $25 - 35^{\circ}$ , и выпадают в более высоких широтах.

Рассмотренные выше, а также и другие соображения, трактующие процессы выпадения радиоактивных осколков не дают исчерпывающего ответа на все вопросы, возникающие при попытках объяснить это сложное явление. По-видимому, дальнейшие исследования в этой области позволят выработать единое мнение о явлениях стратосферного переноса, необходимое для количественного расчета и прогнозирования радиоактивных загрязнений отдельных участков нашей планеты.

По данным научного комитета ООН по действию атомной радиации, при испытаниях ядерного оружия, проводимых до 1963 года, суммарная мощность взорванных боеприпасов и устройств составила 510,9 Мт. Интегральное выпадение радионуклидов на сушу и водную поверхность составило в МКи трития – 3560, углерода-14 – 6,2, железа-55 – 50, стронция-89 – 2800, стронция-90 – 12,2, рутения-106 – 330, церия-144 – 182,4, цезия-137 – 13,5, плутония-239 – 0,32.

Расчеты показали, что поглощенная доза ионизирующего излучения, полученная от радионуклидов, образовавшихся в результате ядерных испытаний, составляет (для населения умеренного пояса Северного полушария Земли) от внешнего облучения – 110 мрад, от инкорпорированных радионуклидов для гонад (половые железы) – 37 мрад, костного мозга – 150 мрад, для легких – 150 мрад.

Формирование поглощенных доз от коротко- и средне- живущих продуктов ядерного взрыва завершилось в 1975-1976 гг. В формировании текущих годовых поглощенных доз основной вклад вносят цезий-137 и стронций-90.

*Предприятия по добыче, переработке и получению расщепляющих материалов искусственных радионуклидов.* К этой группе источников загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами относят предприятия атомной промышленности: урановые рудники, гидрометаллургические заводы по получению уранового концентрата, заводы по очистке урановых концентратов, заводы по получению обогащенного урана и изготовлению тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) для работы АЭС, заводы по производству ядерного горючего.

К отходам, образующимся при добыче урановой руды, относятся шахтные, рудные воды, отвалы и рудничный воздух. Химический состав шахтных вод может колебаться в широких пределах и зависит от разнообразия состава урановых руд. Содержание урана в этих водах достигает 0,3-10 мг/л, радия 0,2 - 3,7 Бк/л. Объем откачиваемых шахтных вод может достигать 2000 м<sup>3</sup> в сутки и более, поэтому в течение суток в окружающую среду возможно поступление более 1 кг урана и 0,2 мг радия. Рудные отвалы в виде хвостов, а также отвальные породы по химическому составу представляют собой в основном

исходную руду. В этих отвалах содержатся сотые доли процента урана, радия –  $5 \cdot 10^{-11}$  –  $1 \cdot 10^{-10}$  г/г. Вследствие вымывания и ветровой эрозии отвалов они могут становиться источником загрязнения окружающей среды. Рудничный воздух, поступающий в атмосферу при вентилировании шахт, может содержать повышенное количество радона и его дочерних продуктов.

Основными отходами гидрометаллургических заводов являются рудные пульпы, (жидкость с находящимися в ней во взвешенном состоянии твердыми частицами минерального сырья грунта, горной породы и т.п.) из которой выщелочено основное количество урана. В твердой части пульпы содержание урана составляет 0,002 - 0,0028 %, радия  $2 - 3 \cdot 10^{-10}$  г/г.

При переработке руды на каждый килограмм извлеченного концентрата урана приходится 0,8-0,9 т твердых и 3,1 - 3,9 т жидких отходов. Для завода перерабатывающего 5000 т руды в сутки количество сбрасываемой твердой части пульпы составляет 500 т, а жидкой части около 2000 м<sup>3</sup>. С этим количеством отходов в окружающую среду могут поступать около 100 кг урана, 111 ГБк дочерних радиоактивных элементов и до 74 МБк радия в сутки. Представленные данные о радиохимическом составе рудных пульп являются ориентировочными, поскольку они могут меняться в зависимости от состава исходных руд и способов их переработки. К жидким радиоактивным отходам гидрометаллургических заводов относятся также воды прачечных и душевых, содержание урана в которых колеблется от 0,5 до 15 мг/л, радия до 5,2 Бк/л. Надо отметить, что в жидкой части отходов могут содержаться разнообразные химические соединения в значительных концентрациях. С газовыми выбросами гидрометаллургических предприятий при удалении вентиляционного воздуха с участков измельчения руды, сушки, проковки, фасовки уранового концентрата в атмосферный воздух могут поступать радон, аэрозоли урана, радия.

На заводах по очистке урановых концентратов (или получению обогащенного урана) в процессе производства возникает 5,7 м<sup>3</sup> жидких отходов на 1 т обогащенного урана. По радиохимическому составу эти отходы аналогичны водам гидрометаллургических предприятий, но содержат меньше радия-226. Газообразные выбросы на этих заводах могут содержать химические соединения урана, ураносодержащую пыль и дым, образующиеся в ходе химических процессов, механической обработки металлического урана.

При изготовлении ТВЭЛов, в результате травления металлов, образуются ураносодержащие жидкие отходы, однако объем их незначителен. Помимо жидких отходов

при обогащении урана и изготовлении ТВЭЛов, образуются твердые отходы, состоящие из загрязненных вышедших из строя оборудования, шлаков, сплавов, бумаги, ветоши и т.д.

Отработанные ТВЭЛы поступают на предприятия регенерации ядерного топлива (радиохимические комбинаты). Здесь производят выделение урана и плутония, а также продуктов их деления, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве источников излучения.

Несмотря на соблюдение всех мер радиационной безопасности, предприятия регенерации ядерного топлива являются источником радиоактивного загрязнения внешней среды. Они периодически сбрасывают сточные радиоактивные воды, хотя и в пределах допустимых концентраций. Следовательно, в окружающей среде неизбежно могут накапливаться радиоактивные вещества, уровень которых необходимо контролировать.

Особые трудности вызывает очистка выходящих газов от йода-131, некоторые количества этого вещества всегда попадает в атмосферу.

*Предприятия, использующие в своей деятельности радиоактивные вещества.* К этой группе потенциальных источников загрязнения окружающей среды относятся радиоизотопные лаборатории в промышленности, лаборатории научно-исследовательских институтов, где проводятся работы с использованием открытых радиоактивных веществ в области биологии, медицины, сельского хозяйства, радиологические отделения медицинских учреждений, применяющие радиоактивные вещества в целях диагностики и лечения и т.д. При применении открытых радиоактивных веществ, в данной группе учреждений, возможно образование газообразных, твердых и жидких отходов. Так, воздух, удаляемый из боксов и вытяжных шкафов, может содержать аэрозоли йода-131, натрия-24, золота-198 и т.д. К жидким радиоактивным отходам можно отнести отходы, образовавшиеся вследствие дезактивации оборудования. К твердым радиоактивным отходам относятся пришедшие в негодность инструментарий, спецодежда, загрязненные радиоактивными веществами, респираторы, фильтровальная бумага, ветошь и др. В лабораториях сельскохозяйственного профиля образуются отходы в форме стеблей, листы, плодов и других сопутствующих материалов. Кроме выше указанных отходов в лабораториях научно-исследовательских институтов биологического и медицинского профиля образуются биологические отходы. К ним можно отнести трупы экспериментальных животных павших в результате введения различными способами радиоактивных затравок, содержащие стронций-90, цезий-137 и др. в научных целях. Культуры клеток, тканей сыворотки, в которые вводились радиоактивные метки - тритий, углерод-14, йод-128 и др.

В настоящее время серьезной опасностью радиационного загрязнения окружающей среды является использование радиоактивных источников в космических исследованиях и астронавтике. При запуске ракет носителей, а также посадке спутников возможны нештатные ситуации (аварии), когда радиоактивный источник может разрушиться и находящийся в нем стронций-90 и плутоний-238 загрязнить окружающую среду. Загрязнение атмосферы при разрушении или сгорании источника тока, работающего на стронции-90, вследствие аварии, равносильно взрыву водородной бомбы. После сгорания источника напряжения в 25 Вт загрязнение атмосферы сопоставимо с загрязнением стронция-90 при взрыве двухмегатонной бомбы. Аналогичные последствия чреваты и при сгорании или аварии генератора напряжения, работающего на плутонии-238. Так, в 1969 году в результате аварии американского спутника над Индийским океаном, в атмосферу поступило радионуклидов с суммарной активностью  $17 \cdot 10^3$  Ки.

Таким образом, подводя итог данному разделу, можно сделать вывод, что технологические процессы атомной промышленности и использование радиоактивных веществ в различных отраслях хозяйства образуют радиоактивные отходы, которые могут быть в газообразном, аэрозольном, жидком и твердом состоянии, а удельная их активность колебаться в пределах от  $3,7 \cdot 10^7$  до  $3,7 \cdot 10^{12}$  Бк и более. При классификации отходов необходимо учитывать ряд факторов: физико-химическое состояние, удельную активность, радиотоксичность изотопов, входящих в состав отходов. Необходимо также отметить, что одним из лимитирующих факторов использования атомной энергии являются экологические аспекты утилизации радиоактивных отходов.

### **Радиационный мутагенез как фактор формирования флоры и фауны**

Содержание радионуклидов в биосфере не было постоянным. В истории Земли отмечены достаточно продолжительные периоды значительного возрастания радиационного фона, что часто отождествляют с содержанием в биосфере урана. Повышение содержания в биосфере радионуклидов неизбежно сопровождалось ускорением процесса мутагенеза во всем органическом мире.

Этот процесс должен был привести к вымиранию отдельных групп наименее радиорезистентных организмов, появлению многочисленных мутантов, наиболее удачные из которых могли определять дальнейшую эволюцию организмов. Таким образом, неоднократно отмеченные в истории нашей планеты эпохи уранонакопления должны были играть значительную, революционную роль в интенсификации темпов эволюции, что находило свое отражение в исчезновении многих старых и появлении новых видов организмов. Существование таких природных революционных изменений в истории

животного мира на Земле отметил еще в начале ХУ111 в Е.Кювье. По мере снижения содержания урана в биосфере в ходе аккумуляирования его органическими и неорганическими отложениями уровень радиации в биосфере снижался, что приводило, в свою очередь, к затуханию мутационных процессов и замедлению эволюции.

Сопоставление реакции фито- и зоопланктона на увеличение концентрации урана в воде свидетельствует о том, что полная гибель водорослей наступает при повышении концентрации урана в воде по сравнению с фоновой в 33000 раз (радиорезистентность зоопланктона примерно в 10 раз ниже, чем фитопланктона). Отмечено, что анаэробное потребление бактериями органического вещества отложений обогащенных ураном сравнительно невелико и не превышает 15-20%, в то время, как в отложениях, не содержащих урана достигает 60-90% от массы исходного вещества. Это, вероятно, связано с угнетением жизнедеятельности микрофлоры в условиях повышенных концентраций урана. Несмотря на то, что присутствие урана в биосфере угнетает жизнедеятельность микрофлоры, тем не менее у некоторых ее представителей, как, например, у иппокукульского штамма *Vaccinella megaterium* привычного к урану, а также у некоторых видов синезеленых водорослей биопродуктивность при увеличении концентрации урана в среде их обитания, напротив, существенно возрастает. Такой реакцией на значительное повышение концентрации урана в водах морских бассейнов обладал вид радиорезистентных синезеленых водорослей, огромная биопродуктивность которых, обусловила накопление богатых сапропелевым органическим веществом илов.

У наземных растительных организмов, таких как, например, *Zea mais* и *Polygonum fagopyrum* при повышении концентрации урана в воде в 400-1400 раз по сравнению с нормой наблюдали увеличение прироста биомассы по сравнению с контролем на 26-60%, а при более высоких концентрациях урана происходило замедление роста этих растений. Обитание растительных организмов в среде с повышенной концентрацией урана приводит не только к изменению их биопродуктивности, но и вызывает их морфологическую изменчивость. У растений *Ferula gigantha* при концентрации урана в них 0,01-0,1% встречаются уродливые формы с искривленными стеблями, скрученными листьями и другими аномалиями. В регионах с повышенной концентрацией урана на фоне угнетения роста и развития большинства растений проявляется, тем не менее, пышное развитие некоторых видов растений, которые являются своеобразными концентраторами урана. Гармала, например, концентрирует до  $1,2 \cdot 10^{-5}$  урана в расчете на сухое вещество.

На организм теплокровных животных присутствие урана оказывает отрицательное воздействие. Накопление урана, распределение его в организме и выделение из организма в



значительной степени зависит от валентности урана в его соединениях. Шестивалентный уран накапливается, в основном, в почках (20%), в костных тканях (до 30%). четырехвалентный уран, главным образом, концентрируется в печени и селезенке (50%), а также в почках (10-20%).

На протяжении всего геологического прошлого Земли неоднократно наблюдались периоды интенсивного одновременного накопления планктоногенного органического вещества и урана, которые совпадают с переломными моментами в эволюции органического мира докембрия, кембрия, девона, карбона, юры и других геологических эпох. При этом установлен примерно одинаковый характер смены флоры и фауны в зависимости от содержания в биосфере урана. Основные закономерности этого процесса представлены на рис. 17 на примере смены флоры и фауны на Русской платформе, происшедшей в позднедевонскую эпоху (около 400 млн. лет тому назад). Повышенным содержанием урана характеризуются, так называемые, доманиковые отложения. От более древних саргаевских и более молодых мендымских отложений доманиковые отложения отличаются отсутствием ряда групп фауны и флоры: донных водорослей, строматопороид, кораллов, мшанок и т.д., сокращением видового состава пыльцы и спор наземных растений, фитопланктона и сменой видового состава брахиопод. Вместе с тем значительное распространение в доманике получают головоногие, радиолярии, пелециподы.

Во все исторические эпохи быстрая изменчивость организмов происходила синхронно с изменениями интенсивности уранонакопления и определялась значительными колебаниями радиационной обстановки в среде обитания организмов. Именно в эпохи уранонакопления значительно возрастала изменчивость организмов, которая проявлялась в появлении большого количества новых видов и вымирании ранее существовавших. Многочисленные новые виды возникали в эпохи радиоактивности в результате мутаций, в истории Земли нередко возникали не только малоцелесообразные, но и абсурдные формы строения организмов, никак не объяснимые с позиции естественного отбора. Последний выполнял роль своеобразного фильтра, через который проходили только "удачные" мутанты.

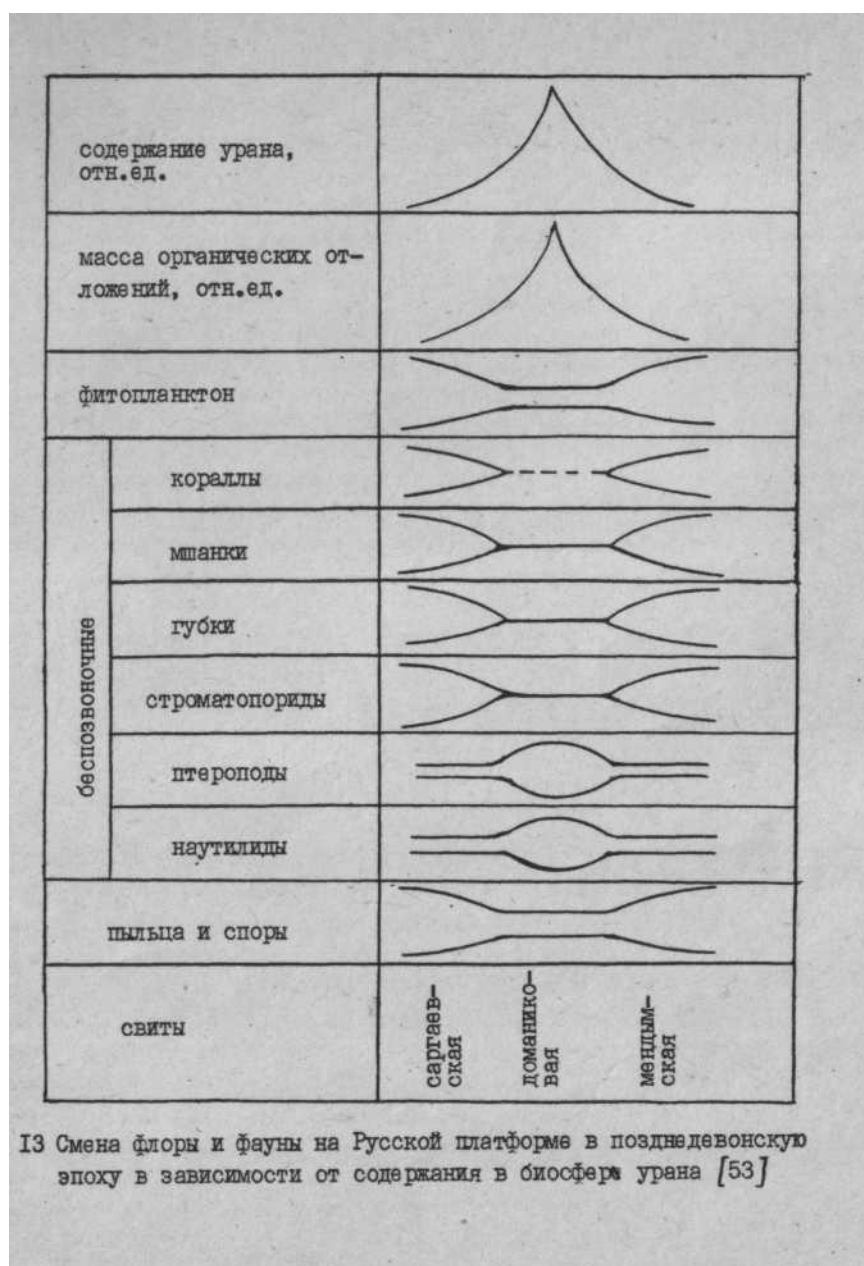


Рис. 17. Смена флоры и фауны на Русской платформе, происшедшей в позднедевонскую эпоху (около 400 млн. лет тому назад).

### Радияция как фактор формирования органических отложений

Древнейшие органические отложения имеют возраст 3,5 млрд лет - микроископаемые органического происхождения в слоистых кварцитах западной Австралии. Вплоть до фанерозоя (500 млн лет тому назад) жизнь на Земле как бы тлела: были простейшие водоросли, грибы, мхи, но дальше этого биологическая эволюция не шла. Вновь и вновь повторялись циклы химической эволюции, создавались новые химические соединения на зыбкой границе живого и неживого вещества.

Особая роль в процессе биологической эволюции, по-видимому, принадлежит урану. Еще В.И.Вернадский отмечал "исключительный факт - концентрацию урана живым веществом". Взаимодействие в биосфере урана и живого вещества, несомненно, оказывало влияние на эволюцию биологических объектов, проявившуюся как в мутагенных изменениях флоры и фауны, так и в специфических особенностях формирования органических отложений. Как показывают геологические данные, эпохи интенсивного накопления урана повторялись с периодичностью в 220 млн лет, что совпадает с периодичностью галактического года. В течение галактического года существовало еще 7 периодов уранонакопления, повторяющихся с интервалом в 32 млн лет. Если процесс уранонакопления, повторяющийся с интервалом, равным галактическому году, связан скорее всего с Космосом, то периодичность уранонакопления с интервалом в 32 млн лет связано с активизацией на Земле вулканических процессов, в результате чего происходит интенсивный выброс вулканических пород, содержащих уран и другие радионуклиды. Характерной реакцией биосферы на повышение содержания урана было, как правило, значительное повышение биопродуктивности ряда простейших, сравнительно радиационно-устойчивых организмов, например, синезеленых водорослей, что и приводило к накоплению в виде органических отложений огромных масс сапропелевого органического вещества. Сохранению этих органических отложений до настоящего времени способствовало и то обстоятельство, что ежегодная генерация огромной массы планктона, содержащей уран в сравнительно малой степени могла быть переработана бактериями, метаболизм которых угнетался присутствием в органических отложениях того же урана. Фито- и зоопланктон после отмирания выполняли наряду с кальцием функции своеобразного санитара планеты, способствовали выведению урана и сопровождающих его радионуклидов из биосферного цикла.

Сохранившееся органическое вещество послужило основой для формирования в морских бассейнах двух различных видов органических отложений. На основе достаточно удаленных от берега морских отложений формируются так называемые сапропелевые илы, в состав которых наряду с ураном, фосфором и другими химическими элементами входят значительные количества органического вещества (от 10 до 50%). Из этих отложений образовались сапропелевые горючие сланцы, например, сланцы крупнейшего месторождения Гран-Ривер. Из осадочных органических отложений при температурах 90+170°C сформировались основные нефтяные и газовые месторождения планеты. Анализ древних и древнейших отложений свидетельствует о том, что во всех органических

отложениях существует определенная связь между содержанием в них органического вещества и урана.

По мнению специалистов, в геологической истории Земли можно выделить не менее 20 сравнительно кратковременных периодов накопления обогащенных планктоногенным органическим веществом и ураном осадков в различных регионах планеты.

Первые вспышки биопродуктивности известны уже в архее, например, черные сланцы Фиг-Три (3,1 млрд лет), которые содержат продукты разложения бактерий и водорослей. Широко известны обогащенные органическим веществом осадки на границе архея и протерозоя (примерно 2,7 млрд лет), например, сланцы месторождения Соуден в северной Америке. Аналогичные отложения есть и в других регионах мира: на севере Европы, в Индии и Африке. С этой эпохой интенсивного накопления органического вещества связано и образование урановых месторождений, концентрация урана в которых часто достигает промышленного уровня, как, например, на месторождении Витватерсранд в южной Африке. Значительным накоплением органического вещества в различных районах мира характеризуются отложения с возрастом примерно 1,8-1,9 млрд лет, в которых отмечено также повышенное содержание урана, например, сланцы Скандинавии, северной и южной Америки. Среди более поздних отложений органического вещества и урана хорошо известны углеродистые отложения на Тянь-Шане (1,5 -1.6 млрд лет), Австралии (1,6 - 1,8 млрд лет), черные ураноносные сланцы северной Америки в районе оз. Мичиган (1,2-1,3 млрд лет). Эпоха интенсивного накопления планктоногенного органического вещества и урана ярко проявляется на всех континентах в конце палеозоя (250-300 млн лет).

Процесс углеобразования в эпохи интенсивного уранонакопления подавлялся, так как в целом наземная растительность значительно менее резистентна по отношению к воздействию ионизирующей радиации, чем простейшие одноклеточные водоросли - фитопланктон.

После отмирания наземных растительных организмов, в процессе формирования из них органических отложений, уран может концентрироваться органическим веществом этих отложений.

### **Радиация и антропогенез**

Появление на Земле антропоидов, а затем и человека, также происходило на фоне неоднократного повышения содержания урана в биосфере.

Последняя значительная эпоха уранонакопления отмечена в конце палеогена начале миоцена (примерно 28 - 30 млн лет тому назад).

С наступлением этой эпохи уранонакопления совпадает длительный перерыв в развитии антропоидов, продолжавшийся примерно 10 млн лет. Самые ранние следы антропоидов имеют возраст около 32 млн лет - это антропоиды Фаима, останки которых найдены на территории Египта. Более поздние следы антропоидов датируются уже ранним миоценом (20 млн лет тому назад). Таким образом, в интервале времени 32-20 млн лет следов эволюции антропоидов пока не обнаружено. Этот разрыв в эволюции антропоидов, возможно, был связан с наступлением эпохи уранонакопления.

На протяжении четвертичного периода (антропогена) увеличение концентрации урана в биосфере происходило, по крайней мере, трижды, что поразному могло влиять на антропогенез. С одной стороны, увеличение содержания урана в биосфере интенсифицировало мутагенез, с другой, приводило к деградации и вымиранию организмов, обладающих низкой резистентностью, к которым в первую очередь, откосятся млекопитающие. Воздействие урана и тория на организм проявлялось, в основном, через посредство дочерних продуктов их радиоактивного распада, в основном, радона  $^{222}\text{Rn}$  и торона  $^{220}\text{Rn}$ .

Появление антропоидов с наличием признаков *Homo sapiens* относят к концу ээма - началу вюрма (75 тыс лет назад), что по времени совпадает с повышением интенсивности уранонакопления. Возможно, это совпадение не является случайным, так как увеличение содержания в биосфере урана, несомненно, привело к усилению процесса мутагенеза. В середине вюрма (40-45 тыс лет назад) исчезают палеантропы и широкое распространение получают *Homo sapiens*. Второй максимум уранонакопления приходится на начало голоцена (10 тыс лет назад). До этого в центральной и западной Европе существовали многочисленные крупные стоянки охотников позднего палеолита, оставивших на стенах пещер общепризнанные шедевры доисторического искусства, например: пещеры Ляско, Арси-сюр-Кюр - во Франции, пещера Кастильо в Испании и др. После всплески уранонакопления это искусство пришло в упадок. Для мезолита (9,5 - 7,5 тыс лет назад) характерны редкие очаги, обособленных друг от друга, культур. Для искусства мезолита характерны "схематизация и общее снижение уровня" - с точки зрения человека XX в понизилась художественная ценность произведений. Сопоставление данных о распределении урана и органического вещества в органических отложениях четвертичного периода с основными этапами развития человека приведены на рис 18.

Наиболее изучена эпоха уранонакопления в среднем голоцене (около 7,5-7,1 тыс лет назад). Обогащенные органическим веществом осадки этой эпохи известны во всех регионах планеты: на Черном и Средиземном морях, в Атлантическом и Тихом океанах -

увеличение содержания урана в биосфере имело, по-видимому, глобальный характер. Наиболее подробно изучены эти осадки в регионе Черного моря. Максимальная интенсивность накопления органического вещества отмечена 7-6 и 4-3 тыс лет назад и синхронна с повышением концентрации урана в осадках. Для первого максимума уранонакопления (в осадках, имеющих возраст 7,1 - 5,5 тыс. лет) характерен ярко выраженный перерыв в культуре. На Кипре до этого существовал неолит-1, после чего наблюдается перерыв в культуре, длившийся 1,5 тыс. лет.

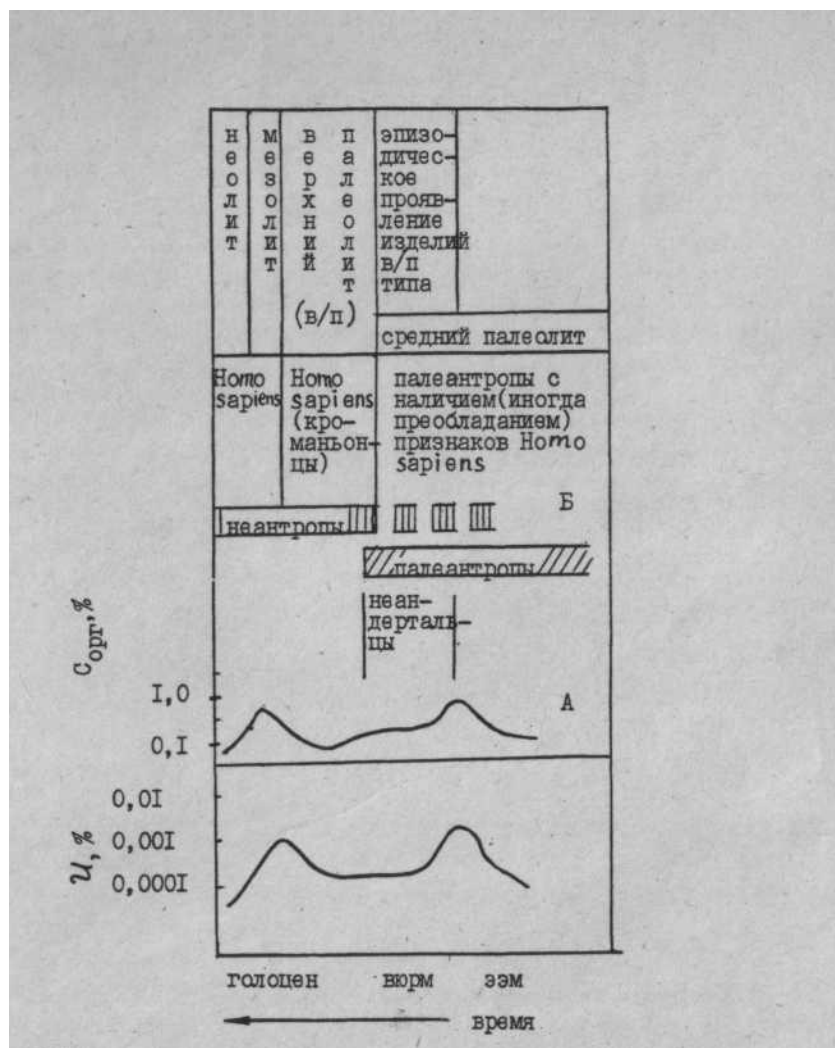


Рис 18. Распределение урана и органического вещества в морских осадках четвертичного периода (А) и этапы развития человека (Б).

В Египте перерыв между мезолитом и неолитом составил не менее 1 тыс. лет, в Палестине развитый неолит до наступления эпохи уранонакопления характеризовался оседлым образом жизни, наличием многих поселений и даже городов, а затем на протяжении 1,5 тыс. лет зарегистрирован ярковыраженный перерыв в культуре. Аналогич-

ные процессы культурной деградации, синхронные с наступлением эпохи ураноаккумуляции отмечены в тот же период времени в Анатолии, Месопотамии и других регионах мира.

Перерывы в культуре связаны, по-видимому, с воздействием ионизирующей радиации на сформировавшиеся к тому времени экосистемы, одним из компонентов которых был *Homo sapiens*.

### Вопросы и задания

Из каких составляющих формируется естественный радиационный фон?

Какие природные источники ионизирующего излучения Вы знаете?

Дайте определение технологически измененному естественному радиационному фону (ТИЕРФ).

Чем обусловлен искусственный радиационный фон (ИРФ)?

Какими радионуклидами определяется радиоактивность атмосферы?

Чем определяется радиоактивность гидросферы?

Поведение радиоактивных веществ в открытых водоемах.

Поведение радиоактивных веществ в подземных водах.

Чем определяется радиоактивность почв?

Чем определяется радиоактивность растительного и животного мира?

Чем определяется радиоактивность тела человека?

Какие существуют радиационные источники загрязнения окружающей среды?

Роль радиации в формировании флоры и фауны.

Роль радиации в формировании органических отложений.

Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

### Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Кудряшев Ю.Б.* Радиационная биофизика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.-448с.
4. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
5. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
6. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
7. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
8. *Тюменев Р.С., Бадрутдинов О.Р.* Радиоэкологические исследования окружающей среды. Методические указания для практических занятий студентов. Казань,1998.-28с.
9. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
10. *Ильенко А.И., Криволуцкий Д.А.* Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
11. *Криволуцкий Д.А.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Криволуцкий Д. А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. М. Наука, 1988. - 240 с.
12. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
13. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
14. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.

**Использованные информационные ресурсы**

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

<http://www.edudic.ru/hie/4407/>

<http://aydernay.ru/archives/category/ener/page/2>



## Лекция 7.

### Защита организмов от радиационного поражения

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы защиты от радиационного поражения, защитные мероприятия при авариях на АЭС, сельскохозяйственное производство в загрязненных условиях.

**Ключевые слова.** Защита количеством, защита временем, защита расстоянием, защита экраном, агрохимия.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи и вопросы к лекции

Обеспечение радиационной безопасности требует комплексных мер многообразных защитных мероприятий, зависящих от конкретных условий радиационной ситуации и в первую очередь от типа источника излучения и способа облучения.

Источники ионизирующих излучений могут быть закрытого и открытого типа.

*Закрытыми источниками* называются любые источники ионизирующего излучения, устройство которых исключает попадание радиоактивных веществ в окружающую среду (табл. 24).

Закрытые источники по характеру действия могут быть разделены на две группы:

- источники излучения непрерывного действия;
- источники излучения, генерирующие излучение периодически.

К первой группе относятся гамма-установки различного назначения, нейтронные, бета- и гамма-излучатели. Ко второй рентгеновские аппараты и ускорители заряженных частиц.

В качестве  $\gamma$ -излучателей находят применение в основном искусственные радиоактивные элементы, помещаемые в порошкообразном или твердом состоянии в герметичные стальные ампулы. Наиболее часто используются как  $\gamma$ -излучатели такие радиоактивные элементы как кобальт-60, селен-75, кадмий-109, теллур-127, цезий-137, европий-154, тулий-170, тантал-182, иридий-192.

В качестве  $\beta$ -источников применяются искусственные радиоактивные изотопы  $\beta$ -излучатели - фосфор-32, стронций-90, иттрий-90, рутений-106, церий-144, празеодим-144, прометий-147, золото-198, талий-204.

Нейтронные источники обычно готовятся путем смешения радия, полония или плутония с бериллием или бором (смесь помещается в герметические стальные ампулы).

Таблица 24

Область применения закрытых источников

Область применения	Вид закрытых источников
Металлургия	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты, аппараты для $\gamma$ -дефектоскопии, радиоизотопные приборы (уровнемеры)
Строительная индустрия	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты, аппараты для $\gamma$ -дефектоскопии
Химическая промышленность	Мощные $\gamma$ -установки, радиоизотопные приборы – уровнемеры, толщиномеры, приборы для снятия электростатических зарядов
Легкая промышленность	Радиоизотопные приборы – уровнемеры, толщиномеры, приборы для снятия электростатических зарядов
Пищевая промышленность	Мощные $\gamma$ -установки, радиоизотопные приборы (уровнемеры)
Геология	Нейтронные и $\gamma$ -источники, радиоизотопные приборы (уровнемеры)
Медицина и биология	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские и $\gamma$ -аппараты, $\gamma$ - и $\beta$ -источники
Сельское хозяйство	Мощные $\gamma$ -установки
Научные исследования	Ускорители заряженных частиц, рентгеновские аппараты, мощные $\gamma$ -установки, нейтронные, $\gamma$ - и $\beta$ -источники.

Активность закрытых источников ионизирующей радиации, которые применяются для различных целей, варьирует в широких пределах. В зависимости от назначения и условий применений общий заряд излучателя может достигать 5,5 ПБк (150000 Ки) и более.

Защитные мероприятия, позволяющие обеспечить условия радиационной безопасности при применении закрытых источников, основаны на знании законов распространения ионизирующих излучений и характера взаимодействия их с веществом. Главные из них следующие:

- доза внешнего облучения пропорциональна интенсивности излучения и времени воздействия;
- интенсивность излучения от точечного источника пропорциональна количеству квантов или частиц, и обратно пропорциональна квадрату расстояния;

- интенсивность излучения может быть уменьшена с помощью экранов.

На этих закономерностях базируются основные принципы обеспечения радиационной безопасности от внешнего облучения при использовании закрытых источников:

- «Защита количеством» - уменьшение мощности источников до минимальных величин;
- «Защита временем» - сокращение времени работы с источниками;
- «Защита расстоянием» - увеличение расстояния от источников до работающих;
- «Защита экраном» - экранирование источников излучения материалами, поглощающими ионизирующие излучения.

Каждый из этих способов может быть использован в отдельности или в комбинации с другими. Это зависит от вида источника от физического состояния радионуклидов (твердые, порошкообразные, жидкие, газообразные), вида и энергии излучения, активности, периода полураспада, относительной радиотоксичности вещества, его количества и характера технологического процесса использования.

Опасность внешнего облучения представляют гамма-излучатели, меньше бета-излучатели. При внутреннем облучении очень опасны бета-излучатели. Для защиты от внешнего облучения приемлемы все названные четыре способа защиты.

*Защита количеством.* Подразумевает проведение работ с минимальной активностью радиоактивных веществ, основывается на уменьшении мощности излучения в прямой пропорции. Этот способ защиты не имеет широкого применения, так как он ограничен требованиями того или иного процесса технологии. Кроме того, уменьшение активности источника увеличивает сроки облучения различных объектов, подвергаемых воздействию ионизирующего излучения.

*Защита временем.* Основывается на уменьшении срока работы с источником: сокращение времени работы с источником излучения, сокращение рабочего дня, рабочей недели. Сокращая сроки работы с источниками, можно в значительной степени уменьшить дозы облучения персонала. Этот принцип защиты особенно часто применяется при работе с источниками относительно малой активности, при прямых манипуляциях с ними персонала. Велика значимость временного фактора и при использовании рентгеновских аппаратов в медицинской практике, особенно при диагностических процедурах. Повышение квалификации врачебных кадров позволяет сократить время работы рентгеновской трубки и, следовательно, уменьшить дозовые нагрузки персонала и обследуемых больных.

*Защита расстоянием.* Это простой и надежный способ защиты. Она обеспечивается достаточным удалением работающих от излучателя или использованием устройств для дистанционной работы. Для защиты могут использоваться различные приспособления – инструменты шарнирные щипцы, универсальные манипуляторы, повторяющие движения рук и пальцев. Эффективность этот принцип защиты, можно видеть на следующем примере

При работе с точечным источником из  $^{60}\text{Co}$  активность 110 МБк в течение одной минуты и при использовании при этом пинцетов длиной 8 см пальцы кисти работающего могут получить дозу около 100 мкГр, а при тех же манипуляциях, но при применении пинцетов длиной 25 см доза облучения составит всего 10 мкГр.

Следует отметить, что хотя принципы защиты временем и расстоянием нашли большее практическое применение, чем принцип защиты количеством, однако широкое их осуществление ограничено требованиями технологии применения источников. Так, в одних случаях требуется облучение тех или иных объектов в течение длительного времени (несколько часов и более), в других случаях сокращение времени работы с источниками уменьшает экономический эффект от их эксплуатации (например, сокращение сроков работы рентгеновской трубки при дефектоскопии стальных слитков уменьшит производительность труда дефектоскопистов), а при работе с мощными источниками ионизирующих излучений возникает необходимость удаления персонала от излучателей на такие расстояния, что принцип защиты расстоянием как единственный самостоятельный способ защиты теряет всякий смысл.

В этих случаях при создании условий, обеспечивающих радиационную безопасность работ с закрытыми источниками, большую роль играет принцип «защиты экранами», используемый в комбинации с принципом защиты расстоянием.

*Защита экраном (или поглощением).* В зависимости от вида ионизирующих излучений для изготовления экранов применяются различные материалы, а их толщина определяется мощностью излучений. Так, лучшими для защиты от рентгеновского и  $\gamma$ -излучений, позволяющими добиться нужного эффекта по кратности ослабления при наименьшей толщине экрана, являются материалы с большим атомным весом ( $Z$ ), например свинец и уран. Однако, учитывая высокую стоимость свинца и урана, могут применяться экраны из более легких материалов - просвинцованного стекла, железа, бетона, баритобетона, железобетона и даже воды. В этом случае, естественно, эквивалентная толщина экранов намного превосходит ту, которая могла бы обеспечить нужную кратность ослабления с помощью свинца или урана.

Кирпич, бетон, баритобетон, железобетон и другие строительные материалы часто используя в качестве исходного сырья для изготовления экранов тех случаях, когда экраны одновременно являются строительными конструкциями сооружений.

Защита от нейтронного излучения экранами основывается на закономерности взаимодействия нейтронов веществом. Наиболее эффективно происходит поглощение тепловых, медленных и резонансовых нейтронов, поэтому для поглощения быстрых нейтронов они должны быть предварительно замедлены. Максимальным замедляющим эффектом обладают элементы с малым атомным номером. Поэтому для защитных экранов обычно применяют воду, парафин, бетон и другие материалы, содержащие в своем составе большое количество атомов водорода.

Тепловые нейтроны очень хорошо поглощаются кадмием и бором, причем для полного поглощения их толщина слоя кадмия, например, может равняться несколькими десятками миллиметра.

Учитывая, что процесс поглощения нейтронов сопровождается излучением  $\gamma$ -квантов, необходимо предусматривать дополнительную защиту из свинца или других эквивалентных материалов.

В реакторах, например, где имеет место мощное излучение нейтронов, могут применяться несколько поглощающих слоев: первый слой - для замедления нейтронов из материалов, содержащих большое количество атомов водорода (бетон, вода и т. д.), второй слой - для поглощения медленных и тепловых нейтронов (бор, кадмий) и третий слой - для поглощения гамма-излучения.

Для защиты от  $\beta$ -потоков целесообразно применять экраны, изготовленные из материалов с малым атомным номером. В этом случае выход тормозного излучения невелик. Обычно в качестве экранов для поглощения  $\beta$ -излучения используются органическое стекло, пластмасса, алюминий. В случае особо мощных  $\beta$ -потоков следует использовать дополнительные экраны для защиты от тормозного излучения.

Для защиты от альфа-излучений может служить небольшой слой воздуха между человеком, работником и источником.

По своему назначению защитные экраны могут быть условно разделены на следующие группы:

1. Защитные экраны - контейнеры, в которые помещаются радиоактивные препараты. Главное их назначение хранение радиоактивных препаратов в нерабочем положении.

2. Защитные экраны для оборудования. В этом случае экранами полностью окружают все рабочее оборудование при положении радиоактивного препарата в рабочем состоянии

или при включении высокого (или ускоряющего) напряжения на источники ионизирующих излучений.

3. Передвижные защитные экраны. Этот тип защитных экранов применяется для защиты рабочего места на различных участках рабочей зоны.

4. Защитные экраны, монтируемые как части строительных конструкций (стены, перекрытия полов и потолков, специальные двери и т. д.). Такой вид защитных экранов предназначается для защиты помещений, в которых постоянно находится персонал, и прилегающей территории.

5. Экраны индивидуальных средств защиты (щиток из оргстекла, смотровые стекла пневмокостюмов, просвинцованные перчатки и др.).

*Открытыми источниками* называются такие источники ионизирующих излучений, при использовании которых возможно попадание радиоактивных веществ в окружающую среду. При этом может быть не только внешнее, но и дополнительное внутреннее облучение персонала. Это может произойти при поступлении радиоактивных, изотопов в окружающую рабочую среду в виде газов, аэрозолей, также в виде твердых и жидких радиоактивных отходов.

Объекты, которые представляют потенциальную опасность загрязнения радиоактивными веществами рабочей среды, можно условно разделить на две группы. К первой относятся лаборатории, учреждения и предприятия, где использование радиоактивных веществ в открытом виде предусмотрено самой технологией производства. Например, в медицинских учреждениях открытые источники применяются для лечения и диагностики ряда заболеваний. В лабораториях сельскохозяйственного профиля - для изучения процессов усвоения растениями вносимых в почву удобрений, оценки роли микроэлементов в питании растений и решения других научно-исследовательских задач. В лабораториях промышленного профиля - для изучения износа деталей различных устройств в машиностроении, для оценки процесса шлакообразования и динамики плавки металлического лома в мартеновских печах и т. д.

Ко второй группе относятся такие объекты, на которых радиоактивные вещества в открытом виде образуются как неизбежные, а в отдельных случаях и как побочные нежелательные продукты технологического процесса. Это - рудники по добыче радиоактивных руд и заводы по их переработке, атомные электростанции и экспериментальные реакторы, мощные ускорители заряженных частиц и др.

Очевидно, что потенциальная опасность внутреннего переоблучения персонала на указанных объектах не равнозначна. Она зависит, прежде всего, от общей активности

радиоактивных веществ на рабочих местах, степени их радиотоксичности, характера производственных операций. Так, чем большее количество радиоактивных веществ применяется при работе, тем (при прочих равных условиях) больше вероятность загрязнения воздуха, рабочих поверхностей и тела работающих; потенциальная опасность внутреннего переоблучения при работе с радиоактивным изотопом.

Главным принципом защиты при работе с открытыми источниками ионизирующего излучения остаются неизменными. К ним относятся все способы защиты, применяемые при работе с источниками излучения в закрытом виде. А также:

- герметизация производственного оборудования с целью изоляции процессов, которые могут явиться источниками поступления радиоактивных веществ во внешнюю среду. Для этих целей используют герметичные камеры, боксы, вытяжные шкафы различных типов и конструкций, механические манипуляторы;

- мероприятия планировочного характера – планировка помещений, максимально обеспечивающая изоляцию работ с радиоактивными веществами от других помещений;

- применение санитарно-технических устройств и оборудования, специальных защитных материалов – предполагает устройство специальных систем вентиляции для защиты воздушной среды рабочих помещений от радиоактивных загрязнений, специальной системы водопроводы, канализации;

- использование средств индивидуальной защиты – предполагает средства защиты органов дыхания и кожных покровов. В этих целях используются: халаты, комбинезоны, костюмы, спецобувь, противопылевые респираторы, противогазы, пневмокостюмы, щитки из оргстекла, просвинцованные фартуки, перчатки, шапочки. Детали одежды должны обладать химической стойкостью, она должна иметь минимальное количество швов, клапанов, карманов;

- выполнение правил личной гигиены или соблюдение правил радиационной асептики. Эти правила существуют для исключения попадания радиоактивных веществ на спецодежду, кожные покровы, в желудочно-кишечный тракт. Сущность правил заключается в приемах одевания и снятия перчаток с целью исключения прикосновения незащищенных пальцев рук с потенциально загрязненной наружной поверхности перчаток. Запрещается курение в рабочей зоне, хранение пищевых продуктов, косметики, домашней одежды и т. д.;

- очистка от радиоактивных загрязнений поверхностей оборудования и средств индивидуальной защиты. При загрязнении радиоактивными веществами оборудования, производственных помещений и средств индивидуальной защиты производится их очистка

от радиоактивного материала. Следует указать, что благодаря применению специальных покрытий большая часть загрязнений имеет слабую связь с поверхностями. Некоторое же количество радиоактивных веществ фиксируется прочно. Поэтому с целью удаления загрязнения применяется не обычная вода, а специально подбираемые растворы, часто сложного состава, которые эффективно разрушают связь радиоактивных веществ возникшую за счет адсорбции и ионного обмена с поверхностью. К веществам, применяемым для удаления радиоактивных изотопов с поверхностей, относятся поверхностно – активные и комплексообразующие соединения (полифосфаты, аминополикарбоновые, лимонная и щавелевая кислоты и их соли). Для удаления радиоактивных загрязнений, имеющих химическую связь с материалом поверхности, могут применяться минеральные кислоты ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ) и окислители ( $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  и др.). Результаты обработки загрязненных поверхностей указанными средствами считаются удовлетворительными, когда уровень загрязнения не превышает допустимых величин.

### **Защитные мероприятия при авариях на АЭС**

Как правило, защитные мероприятия при авариях на АЭС, приводящих к выбросам радионуклидов в атмосферу, зависят в основном от масштаба аварии. Однако существуют общие стандартные принципы защиты населения, которые необходимо знать каждому человеку.

Принятие решений о проведении профилактических и защитных мероприятий на начальном этапе аварии основывается преимущественно на информации, поступающей с АЭС, а не на основе сведений существующего мониторинга окружающей среды. В целях защиты от внешнего и ингаляционного облучения необходимо обеспечить пребывание людей в убежищах, домах при закрытых окнах. Целесообразно законопатить щели дверей и окон влажной бумагой или тканью. Следует знать, что стены домов снижают дозы внешнего облучения в 10 раз и более. Например, в г. Припять в квартирах, где были заперты окна, и форточки в период выброса радиоактивных веществ вещи не были загрязнены радиоактивными выпадениями. Также рекомендуется использовать импровизированные средства защиты органов дыхания, при отсутствии специальных, такие как носовые платки, полотенца, хлопковые ткани, предметы одежды, с помощью которых можно защитить рот и ноздри. Защитная эффективность может быть повышена их смачиванием.

Защита тела сводится к защите кожи и волосяного покрова, что можно обеспечить любыми предметами одежды – головные уборы, куртки, плащи, перчатки, сапоги и т. д. Например, у некоторых больных с ЧАЭС, поступивших в стационар были обширные



лучевые ожоги кожных покровов за исключением защищенных мест. Также следует избегать передвижений по траве. Один сельский житель, который после аварии ехал на велосипеде по полю получил тяжелые лучевые ожоги обеих стоп.

На начальном периоде аварии необходимо проведение экстренной профилактики поражений радиоактивным йодом. Экстренная йодная профилактика должна осуществляться как можно раньше при установлении дозиметрическими службами его наличия в радиоактивном выбросе.

Для профилактики радиационного воздействия радиоизотопов йода на организм и щитовидную железу применяют препараты стабильного йода, которые препятствуют накоплению радиоизотопов йода и способствуют их выведению. Для этого используют препараты калия йодида в таблетках, а при его отсутствии можно заменить водно-спиртовым раствором йода.

Калия йодид применяют в таблетках в следующих дозах: детям от 2 лет и старше и взрослым по 0,125 г, до 2 лет - по 0,04 г на прием внутрь после еды вместе с киселем, чаем, водой 1 раз в день в течение 7 сут. При этом достигается исключительно высокая степень защиты.

Раствор йода водно-спиртовой (5 % йодная настойка) применяется детям от 2 лет и старше и взрослым по 3-5 капель на стакан молока или воды после еды 3 раза в день в течение 7 сут. Детям до 2 лет 5% йодную настойку дают в дозе по 1-2 капли на 100 мл молока или питательной смеси 3 раза в день в течение 7 сут.

Для беременных женщин рекомендуется принимать калия йодид одновременно с перхлоратом калия однократно в сутки по 0,125 г калия йода и 0,75 г калия перхлората, который ослабляет токсическое влияние калия йодида на плод. Препараты принимают внутрь после еды, запивая сладким чаем, киселем, молоком (заведомо чистым). Таблетки принимают до устранения прямой угрозы поступления в организм радиоактивных изотопов йода.

Прием стабильного йода следует начинать при концентрации радиоактивного йода в молоке для детей 3,7 Бк/л, для взрослых 370 Бк/л. Прием алкоголя в любом виде категорически запрещен.

#### **Мероприятия по снижению поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и продукты питания**

*Агрохимические приемы.* Включают известкование почвы, что приводит к нейтрализации кислотности почвы за счет вытеснения ионов  $H_2$  и насыщению его кальцием. Эта процедура позволяет снизить поступление в растения изотопов Sr и Cs- в 1,5

– 3 раза. Внесение минеральных удобрений обеспечивает снижение поступления радиоактивных изотопов в сельскохозяйственные культуры в 3 – 5 раз.

При разовом известковании и внесении калийных и фосфорных удобрений в больших количествах (200 – 300 кг/га) защитный эффект наблюдается в течение 3 – 5) лет.

Применение органических удобрений (навоза, торфа с рН 5,5, ила прудового) способствует снижению доступности радионуклидов для растений в 1,5 – 2,5 раза.

*Агротехнические приемы.* Радикальным способом решения задачи является удаление поверхностного слоя почвы, загрязненного радионуклидами. Для 10 – кратного снижения загрязнения необходимо снять слой почвы толщиной 4 – 5 см. Теоретически возможно, практически трудноосуществимо из-за рельефа местности, состава почвы (тяжелые почвы), возникают проблемы захоронения снятой почвы. Этот прием можно использовать при загрязнении небольших участков поверхности почвы. Наиболее эффективен, из технических приемов, является перепашка почвы на глубину 40 – 70 см и захоронение поверхностного слоя на эту глубину, это позволяет снизить поступление радионуклидов в растения в 5 – 7 раз.

Снизить поступление радионуклидов в травостой можно за счет коренного улучшения лугов путем фрезерования или вспашки загрязненной дернины в сочетании с известкованием, внесений удобрений с посевом травосмеси. Такая обработка снижает поступление цезия-137 в 3 - 10 раз, а стронция-90 в 2 - 5 раз.

Наиболее простым и дешевым является такой агротехнический прием как подбор культур и сортов, отличающихся способностью накапливать в урожае минимальное количество стронция-90 и цезия-137. Так, озимые и позднеспелые растения, при прочих равных условиях, накапливают в 1,5 - 2 раза меньше радионуклидов, чем яровые и скороспелые, соответственно.

Не рекомендуется высевать бобовые, поскольку они накапливают максимальное количество радионуклидов.

*Зоотехнические мероприятия.* Для снижения содержания радионуклидов в продукции животноводства данные мероприятия состоят из следующих приемов:

перевод скота на стойловое содержание и организация зеленого конвейера в летне-пастбищный период в случае загрязнения выпасных лугов;

целенаправленное кормопроизводство;

подборка соответствующих кормов;

полноценное фосфорно-кальциевое питание;

минеральные добавки.

Перечисленные приемы понижают поступление радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных в 2 - 5 раз.

### **Снижение содержания радионуклидов в продукции при ее переработке**

Переработка продукции дает возможность существенно снизить содержание радиоактивных веществ в конечном продукте. Снижение содержания радионуклидов в продукцию можно добиться различными способами переработки.

Промывка проточной водой зерна снижает содержания радиоактивных веществ в 1,5 – 3 раза. Переработка зерна в крахмал в 50 раз. Переработка зерна в спирт в 100 раз. Очистка картофеля в 2 раза, переработка его в крахмал в 50 раз. Срезание поверхностных листьев капусты в 40 раз. Срезание головки корнеплодов в 20 раз. Переработка свеклы в сахар в 50 раз. Отмывка помидоров, огурцов в 3 раза. Засолка отмытых огурцов в 2 – 2,5 раза.

Переработка молока в молочные продукты способствует значительному переходу радионуклидов в обрат, пахту, сыворотку. В масле остается очень низкое содержание радионуклидов, особенно в топленом масле. При перетопке сливочного масла лецитино-белковые оболочки жировых шариков, с которыми связаны стронций-90 и цезий-137, отделяются.

При изготовлении творога, с использованием молочной закваски, в сыворотку переходит стронция-90 - 9,7%; цезия-137 - 87,6%; йода-131 - 73,0%.

Варка мяса обеспечивает переход радионуклидов в бульон от 50 до 90%.

Предварительное вымачивание мелко нарезанного мяса в воде или 0,85%-ном растворе натрия хлористого обеспечивает удаление из мяса 30 - 60% находящегося в нем цезия-137.

При перетопке сала из него в шкварку переходит до 95% радиоцезия.

При варке костей в бульон переходит 0,04% стронция-90, 2,5% йода-131 и 67,0% цезия-137.

### **Сельскохозяйственное производство в загрязненных условиях**

Последствия для сельскохозяйственного производства при выбросе радиоактивных веществ в окружающую среду будут изменяться во времени, что определяет различия в способах ведения хозяйства и особенности проведения специальных защитных мероприятий. Для ведения сельского хозяйства важен сезон, в который произошла авария. Наиболее тяжелыми будут последствия, если радиоактивное загрязнение произойдет в период активной вегетации сельскохозяйственных культур и пастбищного содержания животных.

Первый период послеаварийного выброса, радиоактивных веществ называют периодом йодной опасности из-за наличия в радиоактивных выпадениях короткоживущих радионуклидов йода, прежде всего йода-131. Этот период продолжается несколько месяцев. Особенно острая радиационная ситуация складывается в первые недели. Если выпадение произошло во время пастбищного сезона, радионуклиды йода, попадая на растительность, быстро включаются в пищевые цепочки миграции, по которым интенсивно переходят в молоко. В связи с этим главным защитным мероприятием в этот период является исключение из рациона животных загрязненного пастбищного травостоя, т. е. перевод на стойловое содержание.

Второй период после аварии называется периодом аэрального (воздушного) загрязнения сельскохозяйственных угодий. Он продолжается в течение всего вегетационного периода первого после радиоактивных выпадений. На этом этапе основной путь поступления радионуклидов в продукцию растениеводства - непосредственное поверхностное загрязнение надземной массы растений и почвы. При этом осевшие на почву радионуклиды при обработке посевов могут подниматься в воздух и вторично загрязнять растения. Для уменьшения вторичного загрязнения посевы следует обрабатывать таким образом, чтобы снизить пылеобразование: сократить число междурядных обработок пропашных культур, а необходимую обработку проводить по влажной почве, максимально используя химическую прополку гербицидами с помощью сельскохозяйственной авиации.

Зерновые культуры следует убирать прямым комбайнированием (комбайнами с копнителями). При транспортировке от комбайнов зерно укрывают брезентом или пленкой. Солому скирдуют механизированным способом.

При уборке овощных культур также необходимо максимально применять механизированные способы. Корнеплоды, листовые овощи после мытья в проточной воде и дозиметрического контроля можно использовать в пищу.

Плодовые и ягодные культуры убирают обычным способом, вручную; вопрос об использовании плодов и ягод решается после дозиметрического контроля.

Картофель, собранный с полей, имеющих небольшую плотность загрязнения, может употребляться в пищу после дозиметрического контроля, а из урожая с полей, наивысшей плотности загрязнения, производят засыпку семенного картофеля (его радиоактивность за зиму несколько снижается за счет распада короткоживущих радионуклидов). При закладке картофеля и корнеплодов в бурты с предназначенной для буртования площадки снимают загрязненный слой почвы толщиной не менее 5 см, а бурты укрывают незагрязненной почвой из нижележащего слоя.

Почву под посев озимых обрабатывают (после внесения в нее извести из расчета около 5 т/га) вспашкой с оборотом пласта (без разрыхления почвы плугами с предплужниками) на 4-5 см глубже, чем при обычной вспашке, если позволяет толщина плодородного слоя. Этот способ позволяет в последующие годы при обработке почвы не затрагивать загрязненный слой, перемещенный в подпахотный горизонт. Перед подготовкой почвы к посеву повторно вносят известь (исходя из гидролитической кислотности почвы) и повышенные дозы минеральных удобрений. Дальнейшие операции проводят по принятым в данной местности технологиям.

Технология заготовки сена предусматривает при сушке многоразовое ворошение скошенной массы, что увеличивает загрязнение корма. В связи с этим вместо сена целесообразно заготавливать сенаж и силос. Сено для молодняка заготавливают по принятой технологии, уменьшив количество ворошения с подбором валков пресс-подборщиками. Силос из сеянных многолетних и однолетних трав лучше заготавливать без провяливания скошенной массы в валках.

После очередного стравливания (выпаса скота) или укоса травостоев проводят поверхностное известкование, вносят минеральные удобрения (азотные, калийные) с последующим боронованием. Наиболее эффективный прием, снижающий поступление радионуклидов в пастбищный корм и сено, - коренное улучшение лугов. Эти работы следует начинать как можно раньше и планомерно проводить в последующем на всех загрязненных лугах и пастбищах. При коренном улучшении лугов необходимо проводить поверхностное известкование дернины; вспашку плугами с предплужниками, обеспечивающую перенос загрязненной дернины на глубину; перемещение оборотного пласта (после повторного внесения извести и минеральных удобрений в той же дозе) почвенными орудиями на глубину 10 см, чтобы не извлекать на поверхность запаханную дернину; проводить залужение травосмесями из злаковых трав.

Всю продукцию, произведенную на загрязненной территории в первый год радиоактивных выпадений, можно использовать в пищу только после проведения радиометрического контроля.

Третий период развития радиологической ситуации в сельском хозяйстве начинается со второго вегетационного периода после радиоактивных выпадений. В основном радионуклиды поступают из почвы в растения через корневую систему. Этот период может длиться десятки лет, если в составе выпавшей смеси долгоживущие радионуклиды стронций-90, цезий-137, плутоний-239. Корневое поступление радионуклидов из почвы в растения существенно меньше аэрального загрязнения, поэтому уровень радиоактивного

загрязнения продукции на этом этапе значительно ниже. В течение третьего периода происходит снижение накопления долгоживущих радионуклидов в продукции растениеводства вследствие их распада и уменьшения подвижности в трофических цепочках. Последнее связано с постепенным закреплением радионуклидов твердыми частицами почвы либо их миграцией за пределы корнеобитаемого слоя почвы, а также с проведением специальных агротехнических и агрохимических мероприятий.

Известкование, внесение органических и минеральных удобрений являются обязательными мероприятиями, применение которых способствует получению высокого урожая и уменьшает загрязнение растений радионуклидами.

Распределение радионуклидов на территории, загрязненной в результате аварийного выброса, неравномерно, поэтому необходимо создание зональной системы ведения сельскохозяйственного производства, которая предусматривает комплекс агромелиоративных мероприятий по ограничению перехода радионуклидов в продукцию и территориальное размещение отдельных отраслей производства в зависимости от уровня радиоактивного загрязнения. Зональный принцип ведения агропромышленного производства был применен на территориях, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС. На них были введены четыре зоны по плотности загрязнения.

В первой зоне с плотностью загрязнения цезием-137 до 5 Ки/км<sup>2</sup> районированные культуры и сорта возделываются общепринятыми методами. Все виды работ в земледелии ведутся без ограничения по технологиям для данной почвенно-климатической зоны. Кислые почвы известкуются исходя из их гидролитической кислотности. Минеральные и органические удобрения вносят в дозах, обеспечивающих получение стабильных урожаев.

Ко второй зоне были отнесены сельскохозяйственные площади с плотностью загрязнения цезием-137 в пределах 5-10 Ки/км<sup>2</sup>. На пахотных угодьях растениеводство ведется без ограничений. Минеральные удобрения вносятся в дозах, обеспечивающих получение планируемых урожаев. Использование органических удобрений рекомендуется проводить после радиационного контроля. Но применение навоза, полученного в период интенсивных радиоактивных выпадений, запрещается. Мероприятия на пастбищах и сенокосах зависят от типа почв. Поверхностное улучшение с внесением фосфорных и калийных удобрений и подсевом многолетних трав рекомендуется для пойменных лугов и суходолов на суглинистых и глинистых почвах. Все естественные пастбища и сенокосные угодья на торфяниках и легких по механическому составу почвах подлежат коренному улучшению с внесением повышенных в 1,5 раза фосфорных и калийных удобрений. В личных подсобных хозяйствах производство овощей и картофеля, а также садоводство

ведется без ограничений. Навоз, полученный и первый период после радиоактивных выпадений, вносить запрещается. Для заготовки сена и выпаса скота выделяются участки с наиболее низким уровнем загрязнения, а также угодья после поверхностного или коренного улучшения.

В третьей зоне с плотностью загрязнения цезием-137 в пределах 15 - 40 Ки/км<sup>2</sup> в земледелии рекомендуется вносить известь и повышенные дозы фосфорных и калийных удобрений. Известковые материалы вносятся из расчета 1,5 дозы по гидрологической кислотности. На сенокосах и пастбищах проводится коренное улучшение с ежегодным внесением повышенных в 1,5 раза доз фосфорных и калийных удобрений. Органические удобрения животного происхождения применяются без ограничений.

В личных подсобных хозяйствах вносятся удобрения и известковые материалы. Для выпаса коров используются участки с плотностью загрязнения цезием-137 не выше 5 Ки/км<sup>2</sup> или угодья после коренного улучшения.

Четвертая зона с плотностью загрязнения цезием-137 выше 40 Ки/км<sup>2</sup> выводится из сельскохозяйственного использования. При плотности загрязнения 40 - 80 Ки/км<sup>2</sup> возможно ведение строго контролируемого производства продукции. Поля выводятся из основного севооборота и на них размещаются культуры семенного и технического назначения, а также организуется производство кормов (корне- и клубнеплоды, картофель, кукуруза на силос) для откормочного скотоводства. Сельскохозяйственное производство на этой территории полностью прекращается, территория подлежит залесению.

### **Вопросы и задания**

1. Дайте определение закрытым источникам радиации.
2. Назовите область применения закрытых источников.
3. Какие основные принципы обеспечения радиационной безопасности от внешнего облучения при использовании закрытых источников?
4. Какие защитные мероприятия необходимо провести при авариях на АЭС?
5. Какие мероприятия применяются для снижения поступления радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию и продукты питания?
6. Агрохимические приемы при радиационном загрязнении.
7. Агротехнические приемы при радиационном загрязнении.
8. Зоотехнические мероприятия при радиационном загрязнении.
9. Пути снижения содержания радионуклидов в продукции.
10. Какие особенности сельскохозяйственного производства в загрязненных условиях

Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

## Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Кудряшев Ю.Б.* Радиационная биофизика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.-448с.
4. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
5. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
6. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
7. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
8. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
9. *Кривоуцкий Д.А.* Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999.-384 с.
10. *Ильенко А.И., Кривоуцкий Д.А.* Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
11. *Кривоуцкий Д.А.* Радиоэкология сообществ наземных животных. М. Энергоатомиздат, 1983.- 96 с.
12. *Кривоуцкий Д.А.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Кривоуцкий Д. А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. М. Наука, 1988. - 240 с.
13. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
14. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
15. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.

## Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>



## Лекция 8.

### Закономерности накопления радионуклидов в биоте

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы накопления радионуклидов в почвах и растениях, миграции радионуклидов и их изотопных и неизотопных носителей в трофических цепях основных экосистем, особенности аккумуляции радионуклидов различными фитоценозами.

**Ключевые слова.** Аккумуляция радионуклидов, коэффициенты накопления, изотопные и неизотопные носители

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи, вопросы к лекции и тесты

### Накопление радионуклидов в почвах и растениях

Значительная часть радионуклидов находится в почве, как на поверхности, так и в нижних слоях, при этом их миграция во многом зависит от типа почвы, её гранулометрического состава, водно-физических и агрохимических свойств.

Основными радионуклидами, определяющими характер загрязнения, являются цезий – 137 и стронций – 90, которые по разному сортируются почвой. Основным механизмом закрепления стронция в почве – ионный обмен, цезия – 137 обменной формой либо по типу ионообменной сорбции на внутренней поверхности частиц почвы.

Поглощение почвой стронция–90 меньше цезия–137, а, следовательно, он является более подвижным радионуклидом.

В момент выброса цезия – 137 в окружающую среду, радионуклид изначально находится в хорошо растворимом состоянии (парогазовая фаза, мелкодисперсные частицы и т.д.). В этом случае цезий – 137 легко доступен для усвоения растениями. В дальнейшем радионуклид может включаться в различные реакции в почве, подвижность его снижается, увеличивается прочность закрепления, радионуклид “стареет”, а такое “старение” представляет комплекс почвенных кристаллохимических реакций с возможным вхождением радионуклида в кристаллическую структуру вторичных глинистых минералов.

Механизм закрепления радиоактивных изотопов в почве, их сорбция имеет большое значение, так как сорбция определяет миграционные качества радиоизотопов, интенсивность поглощения их почвами, а, следовательно, и способность проникать их в корни растений. Сорбция радиоизотопов зависит от многих факторов и одним из основных является механический и минералогический состав почвы тяжёлыми по гранулометрическому составу почвами поглощённые радионуклиды, особенно цезий – 137,

закрепляются сильнее, чем лёгкими и с уменьшением размера механических фракций почвы прочность закрепления ими стронция – 90 и цезия – 137 повышается. Наиболее прочно закрепляются радионуклиды илистой фракцией почвы.

Большему удержанию радиоизотопов в почве способствует наличие в ней химических элементов, близких по химическим свойствам к этим изотопам. Так, кальций – химический элемент, близкий по своим свойствам стронцию – 90 и внесение извести, особенно на почвы с высокой кислотностью, ведёт к увеличению поглощательной способности стронция – 90 и к уменьшению его миграции. Калий схож по своим химическим свойствам с цезием – 137. Калий, как неизотопный аналог цезия находится в почве в макроколичествах, в то время как цезий – в ультромикроконцентрациях. Вследствие этого в почвенном растворе происходит сильное разбавление микроколичеств цезия – 137 ионами калия, и при поглощении их корневыми системами растений отмечается конкуренция за место сорбции на поверхности корней. Поэтому при поступлении этих элементов из почвы в растениях наблюдается антагонизм ионов цезия и калия.

Кроме того эффект миграции радионуклидов зависит от метеорологических условий (количество осадков). Установлено, что стронций – 90 попавший на поверхность почвы, вымывается дождём в самые нижние слои. Следует заметить, что миграция радионуклидов в почвах протекает медленно и их основная часть находится в слое 0 – 5 см.

Накопление (вынос) радионуклидов сельскохозяйственными растениями во многом зависит от свойства почвы и биологической особенности растений. На кислых почвах радионуклиды поступают в растения в значительно больших количествах, чем на почвах слабокислых. Снижение кислотности почвы, как правило, способствует уменьшению размеров перехода радионуклидов в растения. Так, в зависимости от свойства почвы содержание стронция – 90 и цезия – 137 в растениях может изменяться в среднем в 10 – 15 раз.

А межвидовые различия сельскохозяйственных культур в накопление этих радионуклидов наблюдается зернобобовыми культурами. Например, стронций – 90 и цезий – 137, в 2 – 6 раз поглощаются интенсивнее зернобобовыми культурами, чем злаковыми. Поступление стронция – 90 и цезия – 137 в травистой на лугах и пастбищах определяется характером распределения в почвенном профиле.

На целинных участках, естественных лугах, цезий находится в слое 0-5 см, за прошедшие годы после Чернобыльской аварии не отмечена значительная вертикальная миграция его по профилю почвы. На перепаханных землях цезий – 137 находится в

пахотном слое. Пойменная растительность в большей степени накапливает цезий – 137, чем суходольная.

Накопление радионуклидов травянистыми растениями зависит от особенностей строения дернины. На злаковом лугу, с мощной плотной дерниной, содержание цезия – 137 в фитомассе в 3 – 4 раза выше, чем на разнотравном, с рыхлой маломощной дерниной.

Культуры с низким содержанием калия меньше накапливают цезия. Злаковые травы накапливают меньше цезия по сравнению с бобовыми. Растения сравнительно устойчивы к радиоактивному воздействию, но они могут накапливать такое количество радионуклидов, что становятся не пригодными к употреблению в пищу человека и на корм скоту.

Поступление цезия – 137 в растения зависит от типа почвы. По степени уменьшения накопления цезия в урожае растения почвы можно расположить в такой последовательности: дерново-подзолистые супесчаные, дерново-подзолистые суглинистые, серая лесная, чернозёмы и т.д. Накопление радионуклидов в урожае зависит не только от типа почвы, но и от биологической особенности растений. Отмечается, что кальциелюбивые растения обычно поглощают больше стронция – 90, чем растения бедные кальцием. Больше всего накапливают стронций – 90 бобовые культуры, меньше корнеплоды и клубнеплоды, и ещё меньше злаковые.

Накопление радионуклидов в растении зависит от содержания в почве элементов питания. Таким образом, миграция радионуклидов во многом зависит от типа почвы, её механического состава, водно-физических и агрохимических свойств. Так на сорбцию радиоизотопов влияют многие факторы, и одним из основных являются механический и минералогический состав почвы. Тяжёлыми по механическому составу почвами поглощённые радионуклиды, особенно цезий – 137, закрепляются сильнее, чем лёгкими. Кроме того эффект миграции радионуклидов зависит от метеорологических условий (количества осадков).

#### **Миграция радионуклидов и их изотопных и неизотопных носителей в трофических цепях основных экосистем**

Радиоактивные вещества попадающие в атмосферу, в конечном счёте концентрируются в почве. Через несколько лет после радиоактивных выпадений на земную поверхность поступления радионуклидов в растения из почвы становится основным путём попадания их в пищу человека и корм животным. При аварийных ситуациях, как показала авария на Чернобыльской АЭС, уже на второй год после выпадений основной путь попадания радиоактивных веществ в пищевые цепи - поступление радионуклидов из почвы в растения. Радиоактивные вещества, попадающие в почву, могут из неё частично

вымываться и попадать в грунтовые воды. Однако почва довольно прочно удерживает попадающие в неё радиоактивные вещества. Поглощение радионуклидов обуславливает очень длительное (в течение десятилетий) их нахождение в почвенном покрове и непрекращающиеся поступления в сельскохозяйственную продукцию. Почва как основной компонент агроценоза оказывает определяющее влияние на интенсивность включения радиоактивных веществ в кормовые и пищевые цепи.

Поглощение почвами радионуклидов препятствует их передвижению по профилю почв, проникновению в грунтовые воды и, в конечном счёте, определяют их аккумуляцию в верхних почвенных горизонтах.

Механизм усвоения радионуклидов корнями растений сходен с поглощением основных питательных веществ – макро и микроэлементов. Определённое сходство наблюдается в поглощении растениями и передвижения по ним стронция – 90 и цезия – 137 и их химических аналогов – кальция и калия, поэтому содержание данных радионуклидов в биологических объектах иногда выражают по отношению к их химическим аналогам, в так называемых стронциевых и цезиевых единицах.

Радионуклиды Ru – 106, Ce – 144, Co – 60 концентрируются преимущественно в корневой системе и в незначительных количествах передвигаются в наземные органы растений. В отличие от них стронций – 90 и цезий – 137 в относительно больших количествах накапливаются в наземной части растений. Радионуклиды, поступившие в подземную часть растений, в основном концентрируются в соломе (листья и стебли), меньше – в мягкие (колосья, метёлки без зерна). Некоторые исключения из этой закономерности составляет цезий, относительное содержание которого в семенах может достигать 10 % и выше общего количества его в надземной части. Цезий интенсивно передвигается по растению и относительно в больших количествах накапливается в молодых органах, чем очевидно вызвана повышенная концентрация его в зерне.

В общем накоплении радионуклидов и их содержании на единицу массы сухого вещества в процессе роста растений наблюдается такая же закономерность, как и для биологически важных элементов: с возрастом растений в их надземных органах увеличивается абсолютное количество радионуклидов и снижается содержание на единицу массы сухого вещества. По мере увеличения урожая, как правило, уменьшается содержание радионуклидов на единицу массы.

Из кислых почв радионуклиды поступают в растения в значительно больших количествах, чем из почв слабокислых, нейтральных и слабо щелочных. В кислых почвах повышается подвижность стронция – 90 и цезия – 137 снижается прочность удержания их

растениями. Внесение карбонатов кальция и калия или натрия в кислую дерново-подзолистую почву в количествах, эквивалентных гидролической кислотности, снижает размеры накопления долгоживущих радионуклидов стронция и цезия в урожае.

Существует тесная обратная зависимость накопления стронция – 90 в растениях от содержания в почве обменного кальция (поступление стронция уменьшается с увеличением содержания обменного кальция в почве).

Следовательно, зависимость поступления стронция – 90 и цезия – 137 из почвы в растения довольно сложная, и не всегда её можно установить по какому-либо одному из свойств, в разных почвах необходимо учитывать комплекс показателей.

Пути миграции радионуклидов в организм человека различны. Значительная их доля поступает в организм человека по пищевой цепи: почва – растения – сельскохозяйственные животные – продукция животноводства – человек. В принципе радионуклиды могут поступать в организм животных через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и поверхность кожи. Если в период радиоактивных выпадений крупный рогатый скот находится на пастбище, то поступление радионуклидов может составить (в относительных единицах): через пищеварительный канал 1000, органы дыхания 1, кожу 0,0001. Следовательно, в условиях радиоактивных выпадений основное внимание должно быть обращено на максимально возможное снижение поступления радионуклидов в организм сельскохозяйственных животных через желудочно-кишечный тракт.

Так как радионуклиды, поступая в организм животных и человека, могут накапливаться и оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье и генофонд человека необходимо проводить мероприятия, снижающие поступление радионуклидов в сельскохозяйственные растения и в организм сельскохозяйственных животных.

### **Особенности аккумуляции радионуклидов различными фитоценозами**

*Аккумуляция радионуклидов растениями лесных фитоценозов.* Особенности поведения радиоактивных элементов в почве и растениях приводят к так называемой биогенной сепарации, которая проявляется в различном изотопном составе загрязненной почвы и произрастающих на ней растений. Распределение радионуклидов по их органам строго специфично и зависит от подвижности данного элемента в растении, его доступности, биологических особенностей растения и т. д. Вопрос о поступлении и распределении в растениях (особенно древесных) различных радиоизотопов изучен недостаточно, что объясняется отчасти трудностями определения радионуклидов в растениях вследствие незначительного их содержания. А между тем изучение поведения различных радиоактивных веществ, особенно долгоживущих, имеет немаловажное значе-

ние для лесного хозяйства, так как дает возможность оценить радиобиологические эффекты, связанные с их транспортом в системе почва—растение, и получить прогнозные данные для разработки лесохозяйственных мероприятий на загрязненных радионуклидами территориях (создание лесных культур, заготовка хвойно-витаминной муки, селекция древесных растений и т. д.).

В выпавших в результате аварии на ЧАЭС радионуклидов наибольший интерес для лесного хозяйства представляют  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , которые при соответствующих условиях могут активно включаться в древесную растительность корневым путем, в значительной мере влияя на ее жизнедеятельность и определять степень использования. Большинство других радиоактивных изотопов ( $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  и др.) усваивается корневыми системами в небольших количествах и с точки зрения загрязнения растительной продукции несущественно. Поэтому необходимо оценить роль основных лесообразующих древесных растений в вертикальной миграции радионуклидов по содержанию радиоактивных веществ в различных органах растений и почве в зависимости от уровня ее загрязнения, установить вклад основных продуктов распада в корневое питание опытных растений. Принималось во внимание, что динамика накопления изучаемых элементов отражает потребность растений в них.

Результаты исследования показали, что из важнейших долгоживущих продуктов деления через корневые системы в надземную часть древесных растений в наибольших количествах поступали  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$ . Они вносили основной вклад в удельную радиоактивность растений (в зависимости от их вида и плотности загрязнения почвы) — от 25 до 80% общей концентрации изучаемых элементов. Поглощение цезия-134 и цезия-137 надземными органами растений шло примерно одинаково (1 : 1). Некоторое несоблюдение этой закономерности при поступлении  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в хвою второго и третьего года жизни объясняется частичным поверхностным ее загрязнением. Наблюдается и определенная видовая специфичность в поглощении цезия-134 и цезия-137 из почвы. Максимальная аккумуляция этого элемента отмечена в листьях березы, несколько меньшая — у дуба. Близкие концентрации цезия обнаружены в фотосинтезирующих органах осины, ольхи, хвое сосны первого года жизни. Относительно высокое содержание цезия-137 и цезия-134 (по сравнению с почвой) наблюдается в хвое сосны обыкновенной второго года жизни.

Поглощение радионуклидов растениями определяется еще и сорбционными процессами в почве. Так, при поступлении из водного раствора в наибольших количествах поглощается  $^{137}\text{Cs}$ , в меньшей степени —  $^{90}\text{Sr}$ , тогда как при поступлении из почвы коэффициент накопления  $^{137}\text{Cs}$  намного меньше, чем  $^{90}\text{Sr}$ .

При исследовании поступления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в древесные растения из почв в Гомельской и Могилевской областях, загрязненных радионуклидами, такой закономерности не выявлено. Наоборот, в значительно больших количествах в надземную часть древесных растений поступает из почвы  $^{137}\text{Cs}$ . Повышенная миграция  $^{137}\text{Cs}$  отмечалась и другими исследователями. Так, известно, что  $^{137}\text{Cs}$  из дерново-подзолистых торфяных, супесчаных и песчаных почв Белорусского Полесья поступает в травянистые растения интенсивнее, чем  $^{90}\text{Sr}$ . На исследованных почвах наблюдается большее (в среднем в 10 раз) по сравнению с  $^{90}\text{Sr}$  поступление  $^{137}\text{Cs}$  в растения, о чем свидетельствует увеличение отношения  $^{137}\text{Cs} : ^{90}\text{Sr}$  (до 16 раз). Считается, что основной причиной значительного поступления  $^{137}\text{Cs}$  в растительность данного региона является малая фиксирующая способность почв по отношению к этому радионуклиду, что обусловлено особенностями их минералогического состава (невысоким содержанием илистых фракций, почти полным отсутствием глинистых минералов и высокой их гидроморфностью). Показано, что растениям доступен не только  $^{137}\text{Cs}$ , находящийся в обменной форме, но и радионуклид в необменной форме.

#### **Коэффициенты накопления радионуклидов**

Сравнительное перемещение радионуклидов в системе почва—растение удобно оценивать с помощью коэффициентов накопления (КН) (отношение концентрации элемента в растении к содержанию этого элемента в почве). При расчете коэффициентов используются данные о концентрации радионуклидов в верхнем (0—5 см) слое почвы и листьях, где находится значительное количество исследуемых радионуклидов.

Обнаружены существенные различия в содержании радиоактивных веществ, обусловленные неодинаковой избирательной поглотительной способностью древесных растений. Наиболее высокие коэффициенты накопления характерны для поступления цезия в березу (2,8—3,8). Коэффициенты накопления для дуба и осины достаточно близки (1,39—1,56 и 1,42—1,44 соответственно). Мало различаются по этому показателю и ольха с сосной. Наиболее высокий уровень потребления стронция у дуба: коэффициент накопления равен 0,79. Близки к нему осина и ольха. Минимальная аккумуляция этого элемента отмечена у сосны (КН = 0,45). Береза по этому показателю занимает промежуточное положение (КН = 0,50). Потребление других радиоактивных элементов (церия, плутония, рутения, празеодима) также неодинаково.

Известно, что поведение стронция-90 в системе почва—растение сходно с миграцией кальция — его основного неизотопного носителя, а цезия-134 и -137 — с калием. Установленные кафедрой почвоведения МГУ закономерности в содержании калия и

кальция в листьях исследуемых древесных пород в основном справедливы и для радиоактивных изотопов стронция-90 и цезия-134 и -137. Больше всего калия, кальция и радионуклидов стронция и цезия поглощают и накапливают листовые древесные растения. Различия в поступлении и содержании радиоактивных изотопов цезия и стронция, обусловленные биологическими особенностями древесных пород, сходны с усвоением растениями их химических аналогов — кальция и калия. Сопоставление данных показывает, что береза, осина и дуб накапливают в своих фотосинтезирующих органах радиоактивный изотоп цезия (как неизотопный калий) в количествах, превышающих их содержание в почве. Накопление радиоактивного стронция из почв идет слабее, чем накопление кальция, но видовая специфичность в основном сохраняется.

Основной агротехнический прием, ограничивающий поступление цезия-134 и цезия-137 из почвы в растение,— применение калийных удобрений — связан с антагонистическим характером отношения цезия и калия в почвенном растворе и эффектом «разбавления» в надземной массе растений. Это нашло подтверждение и в исследованиях белорусских ученых (Шугля, Агеец, 1990). Калийные удобрения в комплексе с другими удобрениями снижают поступление цезия-137 в сельскохозяйственные растения в 2—20 раз. Нейтрализация кислотности почвенного раствора известкованием уменьшает накопление цезия-137 в урожае в 2—4 раза, а на легких по гранулометрическому составу почвах увеличение дозы фосфорных и калийных удобрений на фоне известкования снижает накопление изотопа цезия в растениях до 4—5 раз.

К сожалению, роль азотных удобрений в миграции основных дозообразователей из почвы в хозяйственно ценную часть кормовых травянистых растений освещена весьма противоречиво. Многие исследования свидетельствуют об усилении под влиянием минерального азота процесса миграции радиоактивного цезия в надземные органы кормовых растений, особенно на высокоплодородных почвах. Так, при внесении азота в аммонийной форме на черноземе концентрация цезия-137 в горохе возросла на 18—52%, а на дерново-подзолистой почве — на 72—83%. В то же время азот, внесенный в виде нитратов, практически не влиял на накопление радиоактивного цезия в урожае. Также противоречивы сведения о значении минерального азота в пострadiaционном восстановлении структур растительной клетки. В настоящее время считается целесообразным на почвах, загрязненных цезием-137 и стронцием-90, применять азотные удобрения в составе полной минеральной подкормки со значительным преобладанием калия и фосфора (Алексахин и др., 1991). Внесение азотных удобрений рекомендуется



проводить в таких дозах, которые обеспечивают наиболее высокие прибавки урожая в данных почвенных условиях.

Как известно, уменьшение загрязнения продуктами радиоактивного деления продукции растениеводства с помощью внесения мелиорантов достигается через такие основные механизмы, как увеличение урожая и тем самым «разбавление» содержания радионуклидов на единицу веса урожая; повышение концентрации кальция и калия в почвенном растворе; закрепление микроколичеств радиоизотопов в почве путем внесения соответствующих соединений. И если полученные результаты, по изменению степени аккумуляции  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в сеяных травах под воздействием их совместного произрастания и внесения азотных удобрений, можно рассматривать как проявление этих механизмов через физиолого-биохимические взаимодействия растений в агроценозах и их влиянии на почвенную среду, то исследование миграции плутония в системе почва—растение предполагает разработку подходов, затрагивающих как почвенную химию, так и механизмы действия биотических и агрохимических факторов на его поступление в корни и аккумуляцию в надземных органах. Существует зависимость перехода плутония в раствор при снижении его сорбции почвенными частицами от интервала значений pH, механического состава и водно-воздушного режима почвы.

Сравнительный анализ содержания гамма-излучающих радионуклидов в почве и травах до вспашки (1988 г.) и после, вспашки дернины (1990 г.) позволяет судить об эффективности этого агротехнического приема в снижении миграции радиоизотопов в растения. Вспашка, заглубление верхнего (0—5 см) слоя почвы и последующая культивация при сохранении прежней технологии выращивания трав способствовали «разбавлению» концентрации радионуклидов в корнеобитаемом слое почвы. Эффект от перепахивания почвы для равномерного перемешивания радионуклидов в пахотном горизонте может проявляться в основном в злаках, поскольку поглощающая деятельность корневых систем бобовых трав осуществляется по всему профилю обработанного слоя.

Для ряда доминантных луговых растений установлены как межвидовые, так и внутривидовые различия в аккумуляции радионуклидов. Внутривидовые различия наиболее контрастно проявляются при сопоставлении уровней накопления гамма-излучателей на торфяных и минеральных почвах. При близких показателях плотности загрязнения удельная гамма-активность надземной фитомассы ценопопуляций одних и тех же видов в среднем на порядок ниже на торфяниках по сравнению с дерново-подзолистыми почвами вследствие высокой сорбирующей способности торфяной почвы, что

обеспечивается присутствием в ней значительного количества гумусовых и низкомолекулярных кислот.

Самые низкие коэффициенты накопления гамма-излучающих радионуклидов, до 70—90% которых составляют радиоизотопы цезия, отмечены у луговых доминантов на торфяно-глеевых почвах (0,4—1,5). Значительно интенсивнее накопление гамма-излучателей луговой растительностью происходит на минеральных почвах.

Коэффициенты накопления радионуклидов на одной и той же почвенной разности могут существенно (до 4—6 раз) различаться не только у представителей разных систематических групп, но и у видов в пределах одного семейства, например мятликовых. Поэтому неправомерно использование в сравнительной характеристике накопления радионуклидов луговой растительностью такой таксономической единицы, как семейство. В основе анализа аккумулярующей способности луговых трав в отношении отдельных дозообразующих радиоизотопов должны лежать исследования морфофизиологических особенностей каждого доминанта лугового сообщества с учетом ценоотических отношений компонентов и водно-физических и агрохимических параметров эдафотопы, определяющих концентрацию обменных форм радионуклидов в почвенном растворе.

#### **Влияние внешнего облучения и поглощенных радионуклидов на жизнедеятельность растений**

*Рост, развитие и продуктивность растений.* Наблюдения за ростом и развитием растений, проводившиеся в первые месяцы после аварии на Чернобыльской АЭС в непосредственной близости от реактора, где выпало много радиоактивных осадков, а тип облучения в некоторых местах был близок к острому, выявили отдельные аномалии в морфогенетическом развитии растений, особенно у хвойных (сосны, ели):

- утрата способности апикальных (верхушечных) почек к росту, усиленное образование и рост новых почек, в том числе спящих;
- появление гигантской хвои у сосны и ели и гигантских листьев у дуба, отличавшихся от обычных по длине в 2—3 раза и по массе в 5—7 раз;
- осыпание хвои предшествующих лет образования (2-го и 3-го годов) с функционированием хвои только первого года;
- потеря геотропической чувствительности.

Отмеченные морфозы (гигантизм органов) встречались в 10-километровой зоне довольно часто в 1987—1988 гг. В 1991—1992 гг. была отмечена вторая волна гигантизма органов, которая, как полагают, связана с последовавшим после аварии накоплением радионуклидов в органах растений. Имеются данные о том, что посевы озимой ржи и

пшеницы, расположенные в непосредственной близости от реактора и подвергшиеся загрязнению порядка  $1000 \text{ Ки/км}^2$ , характеризовались замедленным ростом и развитием, имели пониженный индекс листовой поверхности и площади флагового листа на 40—50%.

Посевы пшеницы, подвергшиеся острому облучению в год аварии, в последующие годы дали новое поколение растений, среди которых встречались мутантные формы, характеризовавшиеся отсутствием остей, выпадением отдельных колосков, раздвоением колоса и пр. Среди них можно найти и полезные для селекции формы. Отдельные проявления морфологических изменений растений наблюдали и в белорусском секторе 30-километровой зоны.

При выращивании сельскохозяйственных растений на почвах, загрязненных радионуклидами до  $77 \text{ Ки/км}^2$ , не отмечали никаких особых изменений в их росте и развитии. Основные фазы развития наступали независимо от степени загрязненности почвы, морфологические показатели семян также соответствовали норме. Наблюдения, естественно, касались растений, полученных из «чистых» семян.

Действительно, имеются данные, что уровни загрязнения почвы в пределах  $86 \text{ Ки/км}^2$  не оказывают существенного влияния на показатели роста и развития растения. Однако пересев семян подорожника, хронически облучавшихся в течение трех лет, несмотря на стабильность показателей всхожести, массы 1000 семян и т. д., выявил скрытые изменения, заключавшиеся в неодинаковой реакции растений на дополнительное облучение и неадекватной картине хромосомных аберраций в меристеме корешков.

## **Вопросы и задания**

### **Накопление радионуклидов в почвах и растениях**

1. Какие особенности миграции радионуклидов и их изотопных и неизотопных носителей в трофических цепях основных экосистем.
2. Какие особенности аккумуляции радионуклидов различными фитоценозами.
3. Дайте определение коэффициенту накопления радионуклидов.
4. Как влияет внешнее облучение на жизнедеятельность растений.
5. Как влияют поглощенные радионуклиды на жизнедеятельность растений.
6. Какие аномалии появляются в морфогенетическом развитии растений на загрязненных участках.
7. Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

## Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
4. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. *Тюменев Р.С., Бадрутдинов О.Р.* Радиоэкологические исследования окружающей среды. Методические указания для практических занятий студентов. Казань,1998.-28с.
6. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
7. *Ильенко А.И., Криволицкий Д.А.* Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
8. *Криволицкий Д.А.* Радиоэкология сообществ наземных животных. М. Энергоатомиздат, 1983.- 96 с.
9. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
10. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
11. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.

## Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## Лекция 9.

### Биоиндикация радиоактивных загрязнений

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы биоиндикации радиоактивных загрязнений различными живыми сообществами – растениями, грибами, почвенными животными.

**Ключевые слова.** Растения, грибы, почвенные животные, мхи, лишайники, биоиндикация.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи и вопросы к лекции и тесты

Биоиндикация— оценка качества природной среды по состоянию её биоты. Биоиндикация основана на наблюдении за составом и численностью видов-индикаторов.

В ходе онтогенетического и филогенетического развития любой организм в отношении любого фактора обладает генетически детерминированным и филогенетически приобретённым, уникальным физиологическим диапазоном толерантности, в пределах которой данный фактор не оказывает существенного влияния на жизнедеятельность организма, является переносимым. В случае низкой или высокой интенсивности силы фактора организм находится в зонах физиологического пессимума, когда силы воздействия находится за максимальными или минимальными пределами для конкретного организма — наступает угнетение жизнедеятельности организма и организм погибает. Данный диапазон неодинаков как для различных особей популяции (но колеблется в пределах определённых для вида) и неодинаков в разные стадии жизненного цикла организма, а также в случае, когда значение интенсивности других факторов находятся либо в зоне пессимума или угнетения.

Развитие организма происходит под комплексным, синергетическим воздействием всевозможных комбинаций факторов среды биотической и абиотической природы. Зачастую развитие ограничивают факторы, находящиеся в зоне пессимума или угнетения (так называемое расширенное правило Либиха). В природе происходит лишь частичная реализация физиологических потенциалов — так называемая реализованная экологическая ниша (постконкурентная экологическая ниша, популяционная экологическая ниша, экологический диапазон присутствия, экологический потенциал). Экологический потенциал отражает реакцию организма на воздействие факторов. Физиологическая толерантность и экологическая потенция определяют его индикаторную ценность.

В результате, как состояние организма, так и его численность, структура популяции отражает благоприятность состояния окружающей среды. Такие организмы, жизненные функции которых тесно скоррелированы с отдельными факторами среды называются биоиндикаторами

Существует две формы биоиндикации:

- 1) когда одинаковые реакции организма могут быть вызваны различными факторами среды (в том числе и антропогенного происхождения) — тогда речь идёт о неспецифической биоиндикации;
- 2) когда изменения реакции чётко связаны с изменением конкретного фактора — специфическая биоиндикация.

Биоиндикация — оценка качества среды обитания и её отдельных характеристик по состоянию биоты в природных условиях. Для учёта изменения среды под действием антропогенного фактора составляются списки индикаторных организмов — биоиндикаторов. Биоиндикаторы — виды, группы видов или сообщества, по наличию, степени развития, изменению морфологических, структурно-функциональных, генетических характеристик которых судят о качестве воды и состоянии экосистем. В качестве биоиндикаторов часто выступают лишайники, в водных объектах — сообщества бактерио-, фито-, зоопланктона, зообентоса, перифитона.

### **Растения – как биоиндикаторы радиоактивных загрязнений**

Изучение особенностей содержания радионуклидов в различных компонентах биоты позволило ранжировать их по накопительной способности, выделить виды и структуры концентраторы (биоиндикаторы) и дискриминаторы, а также дать оценку относительного вклада этих компонентов в суммарное загрязнение экосистемы. Это имеет чрезвычайно важное значение при расчетах дозовых нагрузок при миграции радионуклидов по трофическим цепям. В интегрированном виде по уровням концентрации  $^{137}\text{Cs}$  компоненты напочвенного покрова располагаются в следующий ряд: древесный ярус < травяно - кустарничковый ярус < мохово - лишайниковый покров < грибной комплекс. Проведенные исследования показали, что грибы являются абсолютными аккумуляторами  $^{137}\text{Cs}$  в лесном БГЦ. Кратность различий по этому показателю между грибным комплексом и другими компонентами БГЦ составляет 2, а по сравнению с древесиной - 3 математических порядка. Для  $^{90}\text{Sr}$  рассмотренный выше ряд имеет другой вид: грибной комплекс < мохово-лишайниковый покров < травяно-кустарничковый ярус < древесный ярус. В соответствии с этим меняется вклад данных компонентов в загрязнение экосистемы в целом. Для  $^{137}\text{Cs}$  максимальная аккумуляция (до 47% его суммарных запасов в экосистеме) может

аккумулироваться в грибах: для  $^{90}\text{Sr}$  - в древесном ярусе (до 20%), значительно меньше в травяно-кустарничковом ярусе и моховом покрове и практически незначимо (0,2 - 0,1 % и менее) в грибном комплексе.

По итогам черныбыльских исследований было показано, что внутривидовые различия в накоплении радионуклидов значительно меньше, чем вариации этого показателя между различными компонентами БГЦ. При этом наблюдается определенная положительная корреляция между внутривидовым варьированием и накопительной способностью данного компонента, а также его зольностью. Другими словами, чем выше зольность, тем большая аккумуляция радионуклидов отмечается. Минимальное внутривидовое варьирование (в частности по  $^{137}\text{Cs}$ ) отмечается у древесных пород, максимальное - у грибов. В аспекте этих общих положений вопрос о внутрикомпонентном ранжировании видов по их накопительной способности, тем не менее, остается дискуссионным. Причиной, по всей видимости, является то, что накопление радионуклидов в отдельных видах растений и грибов определяется не только их физиологическими особенностями, но и условиями произрастания, сопряженностью корневых систем с зонами максимального загрязнения, то есть характером распределения радионуклидов в почвенном профиле.

Еще в меньшей степени изучены вопросы внутривидового и межвидового варьирования содержания  $^{90}\text{Sr}$  в компонентах лесных экосистем. Решение этих вопросов в целом, по всей видимости, возможно на основании обобщения имеющихся материалов, а также при постановке специальных экспериментов, предусматривающих верификацию полученных закономерностей. В целом же следует подчеркнуть, что исследования по данному направлению необходимо продолжать. В частности, из выделенных нами ранее по итогам черныбыльских наблюдений видов базидиальных грибов, биоиндикаторов радиоактивного загрязнения - *Xerocomus badius*, *Lactarius rufus*, *Paxilus involutus* - только *Xerocomus badius* в полной мере сохраняет свои биоиндикаторные свойства. В настоящее время *Paxilus involutus* не может служить достоверным биоиндикатором. В то же время, по данным на 2000 г., к числу последних может быть причислен *Tylopilus felleus*, аккумуляция  $^{137}\text{Cs}$  в котором, по абсолютной величине, уступает таковой лишь у *Xerocomus badius*.

### **Грибы – как биоиндикаторы радиоактивных загрязнений**

При радиоактивном загрязнении среды грибы играют особую роль, поскольку, с одной стороны, сорбируют ряд радиоизотопов, а с другой - служат продуктом питания. В лесном биогеоценозе они - чемпионы по накоплению радиоактивного цезия. В среднем в грибах концентрация  $^{137}\text{Cs}$  более чем в 20 раз выше, чем в максимально загрязненном слое лесной подстилки и на два-три порядка больше, чем в наименее загрязненной древесине.

Установлено, что грибы поглощают радиоцезий гораздо сильнее, чем такой элемент, как калий.

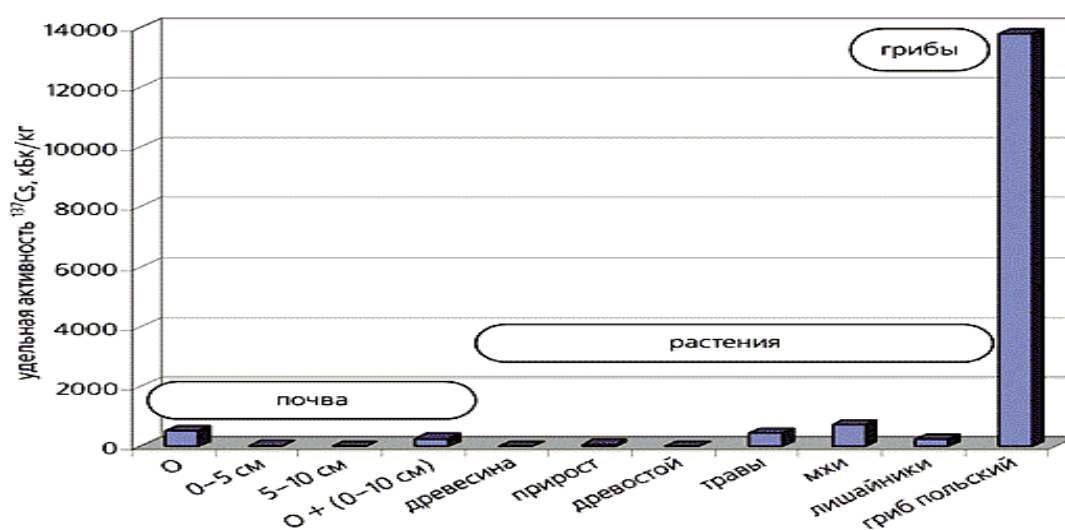


Рис.19. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в различных компонентах биогеоценоза. О - лесная подстилка.

Вместе с тем грибы не отличаются такой способностью по отношению к  $^{90}\text{Sr}$  и изотопам Рu ( $^{238-240}\text{Pu}$ ). Коэффициенты перехода ( $K_p$  = отношение удельной активности грибов к плотности загрязнения почв) изотопов Рu в плодовые тела примерно в 100 раз, а  $^{90}\text{Sr}$  - в 1000 раз меньше, чем для  $^{137}\text{Cs}$ . Интенсивность поглощения  $^{137}\text{Cs}$  сильно зависит от плотности и распределения загрязнения по почвенному профилю, от видовых особенностей, в первую очередь от глубины залегания мицелия и условий произрастания. Как показали исследования, меньше всего радиоцезия в древоразрушающих грибах, а больше - в симбиотрофах, причем накопительная способность у видов этой группы различается в 10 и более раз.

Высокая селективность в поглощении  $^{137}\text{Cs}$  и небольшой срок жизни плодовых тел (всего около 10 дней) позволили рекомендовать грибы как биоиндикаторы радиоактивного загрязнения. В первые годы после Чернобыльской аварии к биоиндикаторам относили гриб польский (*Xerocomus badius*), свинушку тонкую (*Paxillus involutus*), горькушку (*Lactarius rufus*) и масленок обыкновенный (*Suillus luteus*). Однако уже тогда полагали, что по мере загрязнения более глубоких слоев почвы среди видов-биоиндикаторов возможны перестановки. Сейчас к биоиндикаторам причисляют желчный гриб (*Tylopilus felleus*) - он аккумулирует  $^{137}\text{Cs}$  в 100 раз сильнее, чем другие виды грибов того же экотопа. Это свойство желчного гриба обусловлено более глубоким расположением мицелия. А вот



тонкую свинушку в настоящее время нельзя считать достоверным индикатором, поскольку она относится к двум экологическим группам - сапротрофам на почве и факультативным микоризообразователям. Хотя вначале, когда загрязнение локализовалось в поверхностных слоях, она отлично выполняла эту роль. В последующие годы по мере проникновения загрязнения в более глубокие слои биоиндикатором может стать и белый гриб, мицелий которого расположен достаточно глубоко.

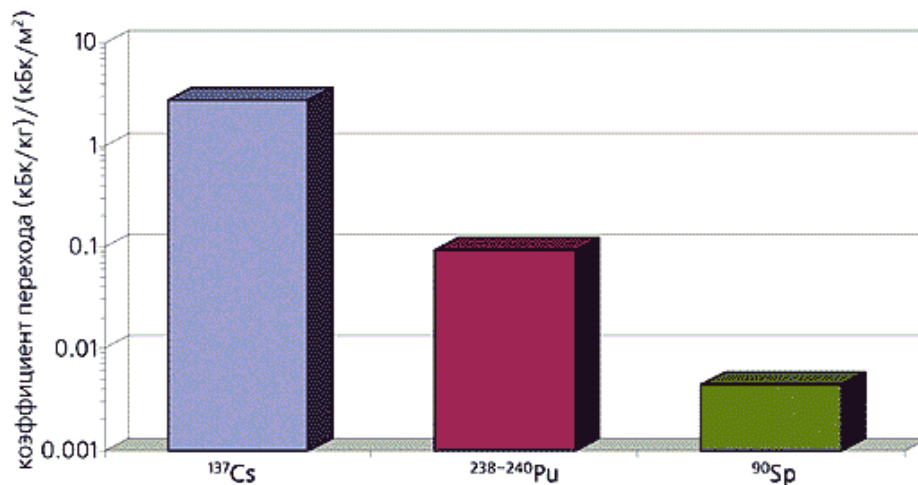


Рис.20. Коэффициенты накопления  $^{137}\text{Cs}$  и тяжелых металлов в различных компонентах биоты соснового фитоценоза (рассчитывали, исходя из содержания элементов в слое 0-10 см).

Таблица 25

Влияние увлажнения на накопление  $^{137}\text{Cs}$  различными видами грибов.

Вид	Элювиальный ландшафт	Аккумулятивный ландшафт
Опенок настоящий ( <i>Armillariella mellea</i> )	1.52	37.0
Дождевик жемчужный ( <i>Lycoperdon perlatum</i> )	2.11	5.55
Сыроежки ( <i>Russula spp.</i> )	2.29	170.2
Гриб-зонтик пестрый ( <i>Macrolepiota procera</i> )	4.81	8.14
Груздь черный ( <i>Lactarius necator</i> )	8.88	70.3
Свинушка тонкая ( <i>Paxillus involutus</i> )	37.0	777.0

Накопительные свойства грибов определяются также условиями их произрастания, и в первую очередь степенью увлажнения почв. Так, на увлажненных и переувлажненных

лесных почвах (аккумулятивные ландшафты) грибы накапливают радиоактивного цезия на порядок больше, чем те же виды, растущие на автоморфных почвах с глубоким залеганием грунтовых вод (элювиальные ландшафты) (табл.25).

Пространственная неоднородность загрязнения почв и огромные площади, занимаемые грибами, не позволяют достоверно оценить влияние других свойств (мощность лесной подстилки, содержание гумуса, pH солевой и водный, содержание обменных Са, Mg, K) на аккумуляцию  $^{137}\text{Cs}$ . Наиболее тесная связь прослеживается между мощностью лесной подстилки и накоплением  $^{137}\text{Cs}$  грибами.

В плодовых телах радионуклиды накапливаются неодинаково. Одни исследователи отмечают, что сильных отличий в концентрации  $^{137}\text{Cs}$  между отдельными частями плодовых тел нет, другие считают, что цезий, как и другие микроэлементы, в большей степени скапливается в шляпках. По нашему мнению, оба эти положения имеют право на существование. У молодых особей различия в удельной активности шляпок и ножек минимальны, они появляются лишь по мере созревания плодовых тел за счет концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в гименофорах (поверхностях, несущих спороносный слой) (табл.26).

Таблица 26

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в разных частях плодовых тел грибов.

Таблица 3				
Содержание $^{137}\text{Cs}$ в разных частях плодовых тел грибов (кБк/кг сырой массы) [12]				
Вид	Гименофор	Шляпки	Ножки	Целиком
Горькушка ( <i>Lactarius rufus</i> )	44.5	15.3	19.8	21.6
Зеленушка ( <i>Tricholoma flavovirens</i> )	45.6	11.7	11.8	16.0
Свинушка тонкая ( <i>Paxillus involutus</i> )	56.0	25.8	21.0	29.0
Волнушка розовая ( <i>Lactarius torminosus</i> )	31.4	21.6	17.0	18.0
Подберезовик ( <i>Leccinum scabrum</i> )	45.0	26.5	21.1	32.0

Какова многолетняя динамика содержания  $^{137}\text{Cs}$  в грибах? На этот счет существуют различные точки зрения. По мнению одних исследователей, концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в грибах со временем очень медленно уменьшается, по мнению других - остается почти неизменной, с незначительными вариациями по годам, поскольку радионуклиды аккумулируются в мицелии. В результате длительных наблюдений установлено, что многолетняя динамика накопления  $^{137}\text{Cs}$  грибами меняется в зависимости от физико-химической природы радиоактивных выпадений; климатических и экологических условий (типа почвы и особенностей строения подстилки), а также видовых различий грибов, в частности глубины распространения мицелия. Для видов с поверхностным расположением мицелия (например, свинушки тонкой) она снижается в 1.5-6 раз (в зависимости от видовой принадлежности и

типа биогеоценоза). Для видов с более глубоким расположением мицелия (желчного и белого грибов) в настоящее время концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах увеличивается. По прогнозам немецких специалистов, к 2011 г. содержание  $^{137}\text{Cs}$  в грибах, мицелий которых в основном расположен в минеральных горизонтах почвы, вырастет на 140%, а в видах с мицелием, находящимся в верхних слоях лесной подстилки, уменьшится до 1% от первоначального уровня.

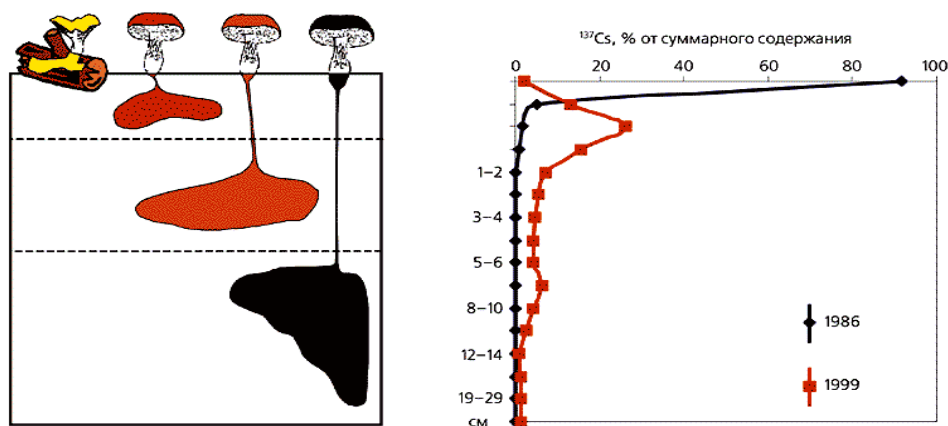


Рис. 21. Распределение мицелия грибов (слева) и  $^{137}\text{Cs}$  в почвенном профиле.

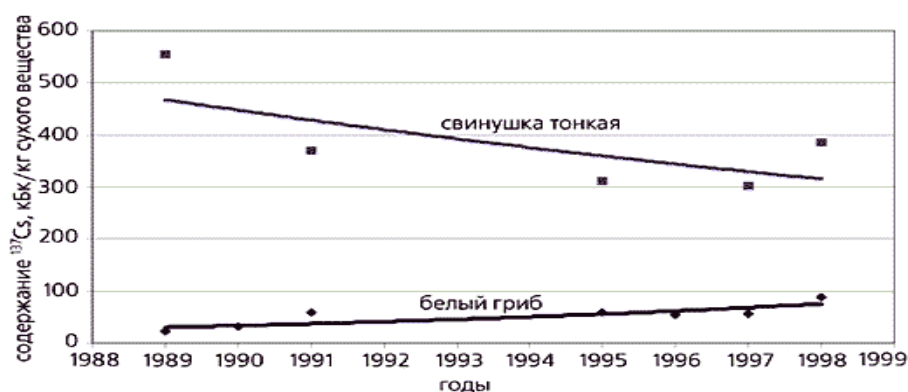


Рис. 22. Многолетняя динамика  $^{137}\text{Cs}$  в грибах с различной глубиной залегания мицелия.

Экспериментальные исследования накопления  $^{137}\text{Cs}$  грибами послужили основой для разработки практических рекомендаций. Съедобные грибы, согласно коэффициентам перехода  $^{137}\text{Cs}$  в плодовые тела, разделили на группы, внутри которых эта величина изменяется в два-четыре раза. К слабонакапливающим в основном относятся виды из экологической группы древоразрушающих грибов, а к аккумуляторам - виды-симбиотрофы.

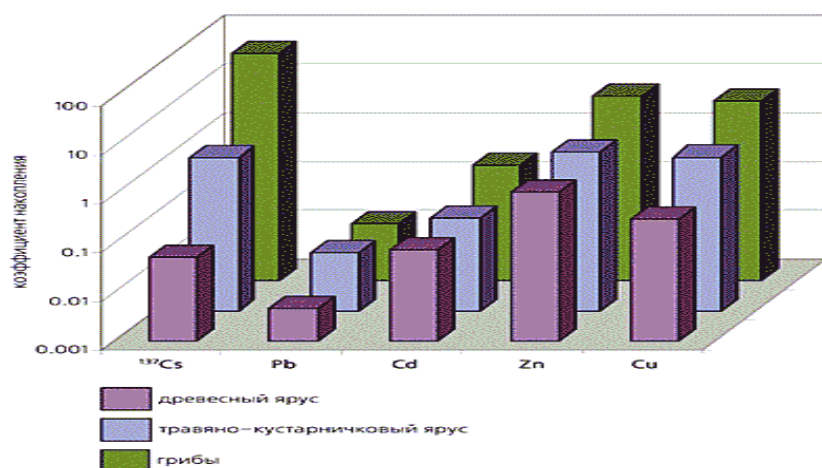


Рис. 23. Накопление различных радионуклидов в грибах, произрастающих в пределах одного экотопа. Кп - коэффициент перехода.

В странах Западной Европы, где радиоактивное загрязнение природных экосистем невелико, а грибы в рационе населения играют значимую роль, дополнительные нагрузки от их потребления составляют примерно  $2/3$  дозы внутреннего облучения от использованных всех пищевых ресурсов леса. В ряде стран, в частности скандинавских, наблюдаются сезонные пики загрязнения мяса промысловых животных, связанные с потреблением ими грибов.

Широкий диапазон плотности загрязнения лесных почв и содержания  $^{137}\text{Cs}$  в грибах, а также отсутствие достоверных количественных показателей их потребления затрудняют оценки дозовых нагрузок на население в регионах России с повышенным радиоактивным фоном. Однако ориентировочные прогнозы показали, что в Смоленской, Тульской, Калужской областях с двух-семикратным превышением радиоактивного фона дозы внутреннего облучения от потребления различных видов грибов колеблются от 0.6 до 3 мкЗв/год. Эти цифры сопоставимы с дозовыми нагрузками, которые имеют любители грибов в странах Западной Европы. На территории ряда районов Брянской обл. с максимальным для России радиоактивным фоном (100-кратным превышением) доля грибов в общей дозе внутреннего облучения человека составляет 0.2-0.6 мЗв/год. Для работников лесного хозяйства этот уровень может достигать 1 мЗв/год только за счет потребления грибов. Кулинарная обработка значительно уменьшает содержание радионуклидов. Так, последовательная варка в течение 15-45 мин с двухкратной (или более) сменой воды снижает концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в грибах до допустимых величин.

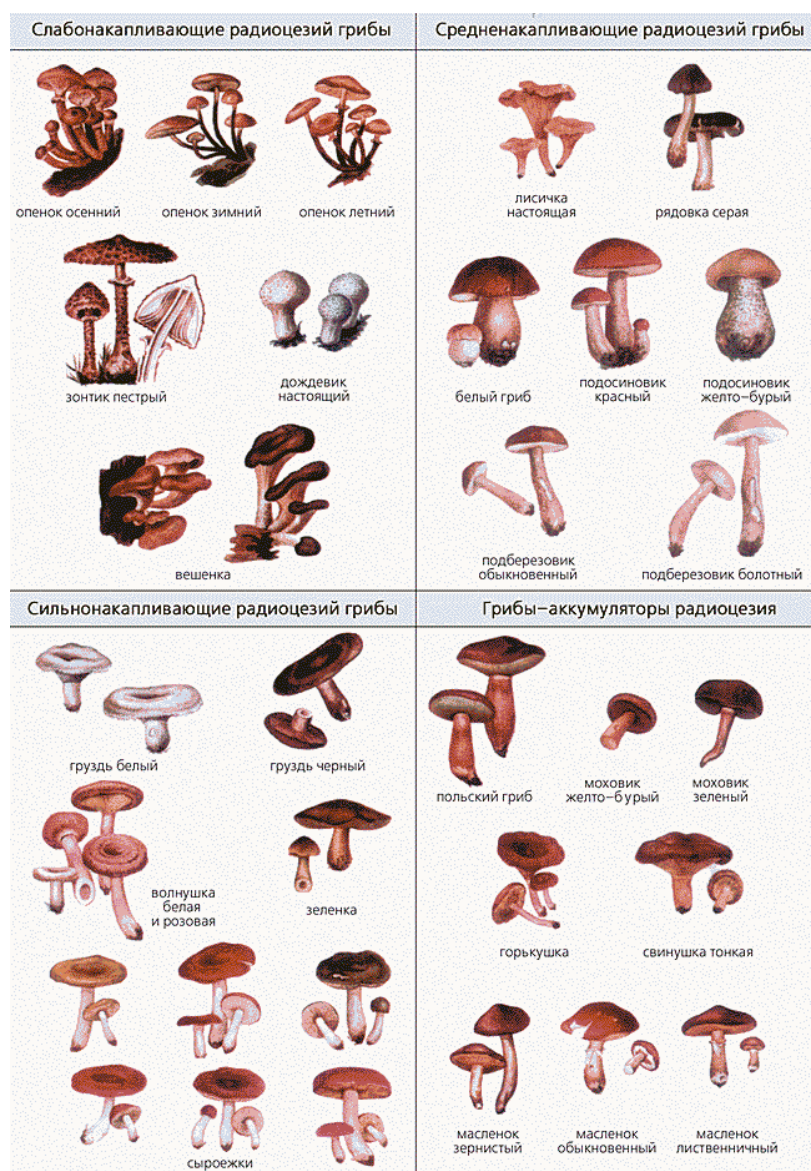


Рис. 24. Основные виды грибов, отличающиеся по степени накопления  $^{137}\text{Cs}$ .

Итак, анализ коэффициентов накопления тяжелых металлов и радиоактивного цезия (отношение концентрации элемента в компоненте к концентрации в почве) показал, что в биоте лесного биогеоценоза грибы - самые сильные накопители всех элементов (в особенности  $^{137}\text{Cs}$ ). В травяно-кустарничковой растительности и структурных частях древесного яруса этих элементов гораздо меньше. Значит, при употреблении грибов, собранных в загрязненных радионуклидами и тяжелыми металлами лесах, высока вероятность не только внутреннего облучения, но и усиленного воздействия этих элементов на организм человека. Отсюда очевидно, что в условиях техногенного загрязнения наиболее действенная мера - просто не есть собранные в лесу грибы и выращивать их в

искусственных условиях. Сегодня современные технологии вполне могут обеспечить всех любителей грибов этим продуктом.

### **Почвенные животные как биоиндикаторы радиоактивных загрязнений**

Открытие атомной энергии и использование ее безграничных запасов – одно из самых выдающихся достижений науки XX века. Но успехи ядерной энергетики стали и источником серьезной и все растущей озабоченности во всем мире. И дело не только в угрозе атомной войны, способной вообще уничтожить человечество. Огромную опасность представляет и загрязнение биосферы радиоактивными веществами. Вызвано оно рассеиванием в атмосфере, в морях и океанах продуктов радиоактивного распада, проникновением их в почву и накоплением в сельскохозяйственной продукции и промысловых рыбах. Радиоактивное загрязнение довольно просто и оперативно устанавливают приборы. Но практика показала, что как бы точны они ни были, только биологические индикаторы (растения, животные, микроорганизмы) позволяют перевести физические и химические показатели в величины, имеющие биологический смысл, то есть получить ответ на основной вопрос: пригодна ли та или иная среда для жизни человека. Как влияет радиация на клетки, ткани и целые живые организмы, каковы методы защиты от нее - этим занимается молодая наука - радиобиология. Одно из ее направлений - радиоэкология. Ее задача - анализ концентрации радионуклидов, изучение закономерностей изменения сообществ и популяций организмов, обитающих в условиях повышенной радиации. Почвенные животные исключительно благодарный объект для радиоэкологических исследований: многие из них весьма чувствительны к действию радиации, в пищевых цепях они часто являются конечными звеньями и могут концентрировать радионуклиды. Животное население почв регулирует численность вредителей леса, что особенно важно в лесных районах, подвергшихся действию радиации. Тесная связь существует и между степенью радиоактивного загрязнения почв и экологией сельскохозяйственных вредителей в этих почвах. Наконец, почвенные животные – удобнейший биоиндикатор радиоактивного загрязнения территорий, так как численность их велика и достигает многих сотен тысяч особей на один квадратный метр, а характер питания фитофагов, сапрофагов и хищников достаточно постоянен, что позволяет установить пути и количественные закономерности миграции радионуклидов в биогеоценозе. Почвенная фауна - наименее миграционная часть зооценоза, именно она теснее всего контактирует с радиоактивными загрязнениями и естественными радионуклидами, поскольку на суше все загрязнения, как радиоактивные, так и химические, рано или поздно попадают в почву.



Необходимость разработки биологических мер борьбы с возможными радиоактивными загрязнениями суши заставляет с особым вниманием отнестись к проблеме регулирования и направленной перестройки животного населения почв, изысканию путей интенсификации биологического круговорота веществ с помощью животных для связывания подвижных соединений радионуклидов и локализации очагов загрязнения в условиях естественных природных экосистем. Одной из форм воздействия на очаг загрязнения могло бы быть расселение и создание условий для массового размножения таких почвенных животных, как кивсяки, которые в значительных количествах накапливают соли кальция и стронция, потребляют растительный опад (а он является одним из самых загрязненных искусственными радионуклидами горизонтов почвы) и в то же время не служат сами пищей для птиц, млекопитающих и хищных насекомых. Поэтому кивсяки могут быть эффективным депо таких радионуклидов, как стронций-90. Как правило, больше радиоактивного стронция накапливают животные, которые откладывают кальций в покровах для увеличения их прочности - почвенные моллюски, кивсяки, мокрицы. Эти животные с успехом могут использоваться в качестве биоиндикаторов загрязнения среды стронцием-90. В восточной Украине кивсяки и виноградные улитки накапливали этот радионуклид в 100 раз больше, чем его содержалось в дубовом опаде - пище этих животных. Учитывая, что стронций-90 прочно связывается почвами и не весь включается в круговорот, можно предполагать, что зоогенная, то есть определяемая животными, миграция этого изотопа, во всяком случае, сравнима с вымыванием дождевыми водами или разносом ветром из биогеоценоза. Наибольшее значение здесь имеют почвенные миграции. Обратимся теперь к другому загрязнителю - цезию-137. Интерес к этому элементу обусловлен не только тем, что это долгоживущий радионуклид (период полураспада - 29 лет) и один из основных агентов радиоактивного загрязнения биосферы. Существенно то, что миграция цезия-137 по трофическим цепям к человеку происходит через животных, через пищевые продукты животного происхождения: молоко, мясо, молочные продукты. Известно, что химически цезий близок калию, с которым и мигрирует по пищевой цепи. Подвижность цезия-137 в круговороте уменьшают микроорганизмы, которые связывают до 60 процентов изотопа, давая ему выщелачиваться из лесной подстилки. Видимо, важную роль в биогенной миграции цезия-137 должны играть почвенные грибы, в золе которых может содержаться до 45 процентов калия. Освобождению этих элементов, их вовлечению в биогенный круговорот способствует деятельность почвенных животных, которые разрушают мертвую органику, частично ее перерабатывают и переваривают значительную часть микробной биомассы, переводя

зольные элементы в подвижное, доступное высшим растениям состояние, как это было выяснено А. Д. Покаржевским в СССР, Д. Кроссли и М. Виткэмпом в США. Радиоэкологическая обстановка для животных резко осложняется, если они постоянно обитают на участках с повышенным содержанием естественных радионуклидов. В таких условиях отмечено резкое повышение концентрации радия позвоночными животными (в 6-132 раза), в меньшей степени - урана (0,3-12 раз), содержание тория не повышается. Особенно много радионуклидов накапливали грызуны, которые постоянно заселяли эти участки. В пределах одного наземного биоценоза могут оказаться виды животных, сильно различающиеся по степени контакта с загрязненными участками, а следовательно, и с ионизирующим излучением. По этому признаку различают животных, случайно контактирующих с загрязнением, временно или постоянно. Но и при постоянном тесном контакте у животных, обитателей одной и той же территории, степень контакта неодинакова. В СССР обстоятельно исследовали действие естественного радия-226 на комплексы почвенных животных. Изучаемые участки были невелики (1-2 гектара) и расположены на надпойменной террасе с луговой растительностью в подзоне средней тайги. Повышенный фон образовался из-за разлива подземных пластовых вод с повышенным содержанием радия. Четкие различия были обнаружены для всех массовых групп почвенных животных, которые развиваются долго и относительно малоподвижны, то есть постоянно обитают на участках с повышенным фоном радиации. Численность всех этих групп была на таких участках явно ниже, чем в контроле (объектами исследования являлись дождевые черви, личинки двукрылых и жуков-щелкунов). Меньшей оказалась и общая заселенность почвы беспозвоночными. Интересно, что особенно заметное угнетение испытывали дождевые черви. На участках с повышенным фоном радиации не только ниже была их численность, но и мельче размеры и наблюдалась задержка в развитии. Таким образом, наибольшему воздействию радиации подвержены оседлые, длительно обитающие на участках с повышенным радиоактивным фоном группы животных, у которых наблюдается задержка развития и нарушения в функции эпителия поверхности тела и кишечника. Действие радиации на почвенных животных хорошо прослеживается не только на участках, где уровень ее высок, но и там, где он низок, по-видимому, из-за больших дозовых нагрузок на почвенных животных по сравнению с наземными. Особенно удобным объектом для изучения можно считать дождевых червей, вероятнее всего, по той причине, что они облучаются не только извне, но и от почвы, которую заглатывают. У всех остальных наземных животных пища растительного или животного характера, в которой содержание естественных радионуклидов в 10-100 раз ниже, чем в почве.



## Радиоактивное загрязнение среды и жизнь в почве

Опыты с облучением естественных, не нарушенных образцов почвы дозами 2,5-5 мегарад от кобальтового источника и в атомном реакторе подтвердили полную стерилизацию почвы, а также глубокие нарушения ее химического состава: содержание аммония в гумусовом слое облученной почвы возросло более чем в десять раз, и он в больших количествах появился в минеральном слое, где ранее полностью отсутствовал. Количество нитратов увеличилось преимущественно в минеральном слое почвы. Микроорганизмы довольно быстро заселяли возвращенные в поле стерилизованные образцы, так что через девять дней те практически сравнялись с контролем и затем в течение двух месяцев заметно не отличались от контроля. Микроартроподы заселяли образцы значительно медленнее, через две недели встречались единичные особи, а через два месяца заселенность все еще сильно отставала от контрольной, особенно в образцах, где было мало грибов. При хроническом облучении леса в Брукхевене (США) отклонений в разложении лесной подстилки не наблюдали. Показателем биологической активности почвы может считаться "почвенное дыхание" - количество выделяемого с единицы поверхности углекислого газа. Когда почву подвергали острому облучению от мощного кобальтового источника дозой 800 и 2500 килорад, почвенное дыхание в обоих случаях резко сократилось. Наблюдения за микроорганизмами через шесть недель после облучения показали, что численность их резко упала. После хронического облучения дозой 800 килорад численность бактерий сократилась в почве почти в 40 раз по сравнению с контролем, грибов - в 6 раз. Острое облучение при 800 килорад вызвало падение численности бактерий в 2,5 раза, грибов - в 10 раз; при 2500 килорад бактерии исчезли вовсе через шесть недель.

Для изучения экологических последствий лучевых воздействий на естественные ценозы в условиях средней полосы СССР проводился многолетний эксперимент с острым гамма-облучением сосново-березового леса дозами 7-25 килорад. Для эксперимента выбрали участок леса, однородный по видовому составу и почвенным условиям, с равномерным распределением одновозрастных деревьев по площади. Этот эксперимент - пока единственный, позволивший изучить воздействие гамма-облучения леса на почвенную фауну. На облученном участке произошли изменения в структуре мезофауны: более чем в пять раз сократилась численность дождевых червей. В результате на опытном участке преобладающей группой стали насекомые, в то время как до облучения и в контроле преобладали дождевые черви. В слое почвы от 0 до 20 сантиметров на контроле заселенность животными была в 1,5-3 раза выше, чем на облученном участке.

Обеднение почвенной фауны в глубоких горизонтах отмечено при всех формах действия ионизирующих излучений на биогеоценоз. Объяснить этот факт можно следующими причинами: в глубине почвы сравнительно больше, чем на поверхности, преимагинальных, а следовательно - гораздо более радиочувствительных стадий животных; поверхностные слои после облучения легче заселяются извне; глубокопочвенные виды менее плодовиты, чем поверхностные, и медленнее восстанавливают численность популяций. Даже через два года не восстановили численности дождевые черви – основная группа беспозвоночных, пострадавших от облучения. Комплекс микрофауны, хотя и пострадал от одноразового сильного облучения, общего угнетения не испытал и довольно быстро стал восстанавливать свою первоначальную структуру. И происходило это за счет "внутренних ресурсов" комплекса, а не за счет миграции животных извне, с необлученных территорий. В СССР проведены многочисленные эксперименты с загрязнением почв искусственными радионуклидами и последующим изучением экологии почвенных животных, они позволяют решить прикладные вопросы и лучше уяснить, каковы плодовитость, продолжительность жизни, интенсивность обмена, химический состав, трофические связи животных. Обширный материал собран и по экологии микроорганизмов, развитию корневых систем растений в условиях повышенного фона ионизирующей радиации. Фактически сформировалось новое направление - радиобиология почвы, и здесь очень велик вклад советских исследователей: дозиметристов, почвоведов, биологов. Приступая к изучению воздействия ионизирующих излучений на животное население почвы, ученые не могли предвидеть всего того, с чем придется встретиться в процессе полевой работы. Сложность усугублялась тем, что наземные беспозвоночные - организмы весьма радиоустойчивые во взрослом состоянии. Радиочувствительность насекомых, дождевых червей, мокриц, паукообразных составляет 50-200 килорад, что значительно выше, чем у растений. Поскольку содержание стронция-90 в наземной части насаждений значительно меньше, чем в почве, дозы облучения животных, обитающих в верхних ярусах леса, оказываются значительно ниже, чем почвенных обитателей. Но и в почве эти дозы не настолько велики, чтобы оказывать непосредственное воздействие на беспозвоночных, особенно в личиночной и взрослой стадиях. Тем не менее они все же снижают численность популяций многих видов. Это можно объяснить тем, что ряд видов лесных насекомых, а также представителей микро- и мезофауны, зимует в почве в стадии яйца, то есть в наиболее радиочувствительной эмбриональной стадии. Если принять во внимание, что облучение в этом случае продолжается в течение нескольких месяцев, доза облучения, накопленная за это время, могла составить в наших экспериментах 200-300 рад, то есть

довольно значительную величину. При облучении в лабораторных условиях, как известно, дозы облучения от нескольких сотен до нескольких тысяч рад приводят к стерильности самцов и самок насекомых и гибели яиц. На лесных участках, загрязненных стронцием-90, численность мезофауны сократилась более чем в два раза. Но более всего (в 10-100 раз) сократилась численность дождевых червей и многоножек (губоногих и двупарноногих) - потребителей мертвого растительного опада, обитающих преимущественно в лесной подстилке и верхнем слое почвы, где сконцентрирована основная часть радионуклидов. Изменения видового состава - сокращение видового разнообразия - обнаружены и в микрофауне, в частности, в популяциях панцирных клещей. Сообщества почвенных животных чутко реагируют на повышенный хронический уровень ионизирующей радиации при дозах порядка 0,5-3 рада в сутки. При этом уменьшается видовое разнообразие оседло живущих беспозвоночных, глубина заселения почвы, падает численность. Особенно сильно действие радиации проявляется в период размножения животных. У почвенных беспозвоночных уязвимыми для действия радиации являются ранние стадии жизненного цикла. Ранние стадии развития дождевых червей столь же чувствительны к действию радиации, как и человек. Взрослые стадии почвенных животных достаточно устойчивы к действию ионизирующей радиации, не уступают по этому показателю лесным и луговым растениям, а нередко в три-пять раз превосходят растения. Но животных "подводит" здесь уязвимость для радиации ранних стадий, их длительный период развития, за который они успевают облучиться значительными дозами радиации даже в условиях малой мощности, но хронического облучения. Уязвимость почвенной фауны усиливается также из-за того, что почва аккумулирует многие радионуклиды, попавшие в биосферу, в том числе стронций-90 и цезий-137, а такие массовые обитатели почвы, как дождевые черви, заглатывая почву при питании, получают немалые дозы облучения и от пищевого комка, что становится особенно важным при загрязнении почв радионуклидами - альфа-излучателями. Велико участие почвенных животных в зоогенной миграции искусственных радионуклидов, главным образом из-за высокой биомассы этих животных и их роющей деятельности.

### **Вопросы и задания**

1. Дайте определение биоиндикации.
2. Сформулируйте правило Либиха.
3. Дайте определение неспецифической биоиндикации.
4. Дайте определение специфической биоиндикации.
5. Какие растения могут служить биоиндикаторами радиоактивных загрязнений.
6. От чего зависит аккумуляция радионуклидов растениями.

7. Какие грибы могут служить биоиндикаторами радиоактивных загрязнений ю
  8. Как влияет увлажнение на накопление  $^{137}\text{Cs}$  различными видами грибов.
  9. Какие почвенные животные служат биоиндикаторами радиоактивных загрязнений.
  10. Какие почвенные животные служат биоиндикаторами загрязнения почвы стронцием-90.
  11. Какой параметр может служить показателем биологической активности почвы.
- Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

### Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Кудряшев Ю.Б.* Радиационная биофизика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.-448с.
4. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
5. *Криволуцкий Д.А.* Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999.-384 с.
6. *Ильенко А.И., Криволуцкий Д.А.* Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
7. *Криволуцкий Д.А.* Радиоэкология сообществ наземных животных. М. Энергоатомиздат, 1983.- 96 с.
8. *Криволуцкий Д.А.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Криволуцкий Д. А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. М. Наука, 1988. - 240 с.
9. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
10. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
11. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.

### Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## Лекция 10.

### Типы ядерных реакторов

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы устройства и работы ядерных реакторов различных типов, загрязнения окружающей среды при их работе.

**Ключевые слова.** ВВЭР, РБМК, тяжелая вода, нейтроны, радиоактивное загрязнение.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются вопросы к лекции и тесты.

### Ядерный реактор

Ядерный реактор - аппарат, в котором происходят ядерные реакции - превращения одних химических элементов в другие. Для этих реакций необходимо наличие в реакторе делящегося вещества, которое при своем распаде выделяет элементарные частицы, способные вызвать распад других ядер.

Деление атомного ядра может произойти самопроизвольно или при попадании в него элементарной частицы. Самопроизвольный распад в ядерной энергетике не используется из-за очень низкой его интенсивности.

В качестве делящегося вещества в настоящее время могут использоваться изотопы урана: уран-235 и уран-238, а также плутоний-239.

В ядерном реакторе происходит цепная реакция. Ядра урана или плутония распадаются, при этом образуются два-три ядра элементов середины таблицы Менделеева, выделяется энергия, излучаются гамма-кванты и образуются два или три нейтрона, которые, в свою очередь, могут прореагировать с другими атомами и, вызвав их деление, продолжить цепную реакцию. Для распада какого-либо атомного ядра необходимо попадание в него элементарной частицы с определенной энергией (величина этой энергии должна лежать в определенном диапазоне: более медленная или более быстрая частица просто оттолкнется от ядра, не проникнув в него). Наибольшее значение в ядерной энергетике имеют нейтроны.

В зависимости от скорости элементарной частицы выделяют два вида нейтронов: быстрые и медленные. Нейтроны разных видов по-разному влияют на ядра делящихся элементов.

Уран-238 делится только быстрыми нейтронами. При его делении выделяется энергия и образуется 2-3 быстрых нейтрона. Вследствие того, что эти быстрые нейтроны

замедляются в веществе урана-238 до скоростей, неспособных вызвать деление ядра урана-238, цепная реакция в уране-238 протекать не может.

Поскольку в естественном уране основной изотоп - уран-238, то цепная реакция в естественном уране протекать не может.

В уране-235 цепная реакция может протекать, когда нейтроны замедлены в 3-4 раза по сравнению с быстрыми, что происходит при достаточно длинном их пробеге в толще урана, без риска быть поглощенными посторонними веществами или при прохождении через вещество, обладающее свойством замедлять нейтроны, не поглощая их.

Поскольку в естественном уране имеется достаточно большое количество веществ, поглощающих нейтроны (тот же уран-238, который при этом превращается в другой делящийся изотоп - плутоний-239), то в современных ядерных реакторах необходимо для замедления нейтронов применять не сам уран, а другие вещества, мало поглощающие нейтроны (например, графит или тяжелую воду).

Обыкновенная вода нейтроны замедляет очень хорошо, но сильно их поглощает. Поэтому для нормального протекания цепной реакции при использовании в качестве замедлителя обыкновенной легкой воды необходимо использовать уран с высокой долей делящегося изотопа - урана-235 (обогащенный уран). Обогащенный уран производят по достаточно сложной и трудоемкой технологии на горно-обогатительных комбинатах, при этом образуются токсичные и радиоактивные отходы.

Графит хорошо замедляет нейтроны и плохо их поглощает. Поэтому при использовании графита в качестве замедлителя можно использовать менее обогащенный уран, чем при использовании легкой воды.

Тяжелая вода очень хорошо замедляет нейтроны и плохо их поглощает. Поэтому при использовании тяжелой воды в качестве замедлителя можно использовать менее обогащенный уран, чем при использовании легкой воды. Но производство тяжелой воды очень трудоемко и экологически опасно.

При попадании медленного нейтрона в ядро урана-235 он может быть захвачен этим ядром. При этом произойдет ряд ядерных реакций, итогом которых станет образование ядра плутония-239. (Плутоний-239 в принципе может тоже использоваться для нужд ядерной энергетики, но в настоящее время он является одним из основных компонентов начинки атомных бомб.) Поэтому ядерное топливо в реакторе не только расходуется, но и нарабатывается. У некоторых ядерных реакторов основной задачей является как раз такая наработка.

Другим способом решить проблему необходимости замедления нейтронов является создание реакторов без необходимости их замедлять - реакторов на быстрых нейтронах. В таком реакторе основным делящимся веществом является не уран, а плутоний. Уран же (используется уран-238) выступает как дополнительный компонент реакции - от быстрого нейтрона, выпущенного при распаде ядра плутония, произойдет распад ядра урана с выделением энергии и испусканием других нейтронов, а при попадании в ядро урана замедлившегося нейтрона он превратится в плутоний-239, возобновляя тем самым запасы ядерного топлива в реакторе. В связи с малой величиной поглощения нейтронов плутонием цепная реакция в сплаве плутония и урана-238 идти будет, причем в ней будет образовываться большое количество нейтронов.

Таким образом, в ядерном реакторе должен использоваться либо обогащенный уран с замедлителем, поглощающем нейтроны, либо необогащенный уран с замедлителем, мало поглощающем нейтроны, либо сплав плутония с ураном без замедлителя. О различных типах ядерных реакторов, реализующих эти три возможности разными способами, будет говориться дальше.

Как уже указывалось, тремя обязательными элементами для реакторов на тепловых нейтронах являются тепловыделитель, замедлитель и теплоноситель. На данном рисунке представлена типичная схема активной зоны (рис.25).

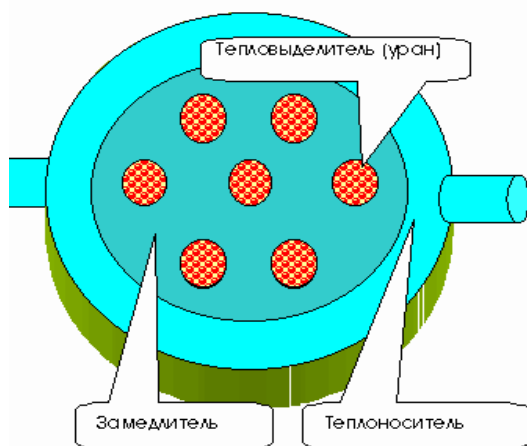


Рис.25. Схема активной зоны

Через реактор с помощью насосов (обычно называемых циркуляционными) прокачивается теплоноситель, поступающий потом или на турбину (в РБМК) или в теплообменник (в остальных типах реакторов). Нагретый теплоноситель теплообменника поступает на турбину, где теряет часть своей энергии на выработку электричества. Из

турбины теплоноситель поступает в конденсатор для пара, чтобы в реактор поступал теплоноситель с нужными для оптимальной работы параметрами. Также в реакторе имеется система управления им, которая состоит из набора стержней диаметром в несколько сантиметров и длиной, сопоставимой с высотой активной зоны, состоящих из высокопоглощающего нейтроны материала, обычно из соединений бора. Стержни располагаются в специальных каналах и могут быть подняты или опущены в реактор. В поднятом состоянии они способствуют разгону реактора, в опущенном - заглушают его (Ганев,1992). Приводы стержней регулируются независимо друг от друга, поэтому с их помощью можно конфигурировать активность реакции в различных частях активной зоны.

### **Устройство различных типов ядерных реакторов**

В настоящее время в мире существует пять типов ядерных реакторов. Это реактор ВВЭР (Водо-Водяной Энергетический реактор), РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный), реактор на тяжелой воде, реактор с шаровой засыпкой и газовым контуром, реактор на быстрых нейтронах. У каждого типа реактора есть особенности конструкции, отличающие его от других, хотя, безусловно, отдельные элементы конструкции могут заимствоваться из других типов. ВВЭР строились в основном на территории бывшего СССР и в Восточной Европе, реакторов типа РБМК много в России, странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии, реакторы на тяжелой воде в основном строились в Америке. Параметры этих реакторов лучше всего представить в виде таблицы (табл.27).

### **Характеристика реакторов ВВЭР, РБМК, на тяжелой воде, с шаровой засыпкой, на быстрых нейтронах**

Реакторы ВВЭР являются самым распространенным типом реакторов в России. Весьма привлекательны дешевизна используемого в них теплоносителя-замедлителя и относительная безопасность в эксплуатации, несмотря на необходимость использования в этих реакторах обогащенного урана. Из самого названия реактора ВВЭР следует, что у него и замедлителем, и теплоносителем является обычная легкая вода (рис.26). В качестве топлива используется обогащенный до 4.5% уран.



## Параметры реакторов

Параметры сравнения	ВВЭР	РБМК	Реактор на тяжелой воде
Тепловыделитель	4.5%-й обогащенный уран	2.8%-й обогащенный уран	2-3%-й обогащенный уран
Замедлитель и его свойства	Легкая вода. Очень хорошо замедляет нейтроны, очень сильно поглощает нейтроны. Очень дешева.	Графит. Хорошо замедляет нейтроны, почти не поглощает нейтроны. Достаточно дешев.	Тяжелая вода. Очень хорошо замедляет нейтроны, почти не поглощает нейтроны. Очень дорога в производстве.
Особенности активной зоны, определяемые параметрами замедлителя	Тесное расположение тепловыделяющих элементов, необходимость повышенного обогащения урана	Достаточно редкое расположение тепловыделяющих элементов, возможность использования низкообогащенного урана или отработанного топлива ВВЭР	Достаточно редкое расположение тепловыделяющих элементов, возможность использования низкообогащенного урана или отработанного топлива ВВЭР
Количество контуров	Два	Один	Два
Теплоноситель	Легкая вода в обоих контурах. Одновременно является замедлителем.	Легкая вода. Замедляющий эффект незначителен.	Тяжелая вода в первом контуре, легкая вода во втором. Тяжелая вода одновременно является замедлителем.
Регулирование	Раствор борной кислоты в теплоносителе. Регулирующие стержни из бороциркониевого сплава и оксида европия.	Регулирующие стержни из бороциркониевого сплава и оксида европия.	Регулирующие стержни из бороциркониевого сплава и оксида европия.
Перегрузки топлива	1 раз в 4-6 месяцев, с полной остановкой реактора и вскрытием его корпуса. Каждый тепловыделяющий элемент переставляется внутри реактора трижды до его окончательного извлечения.	В процессе работы, с помощью специальной перегрузочной машины, позволяющей перезагружать отдельные тепловыделяющие элементы. Каждый тепловыделяющий элемент переставляется внутри реактора несколько раз до его окончательного извлечения.	Раз в несколько месяцев, с полной остановкой реактора.
Наружный отражатель	Наружный металлический корпус.	Графитовая кладка толщиной 65 см. Наружный корпус не обязателен, но желателен по соображениям безопасности	Наружный металлический корпус.

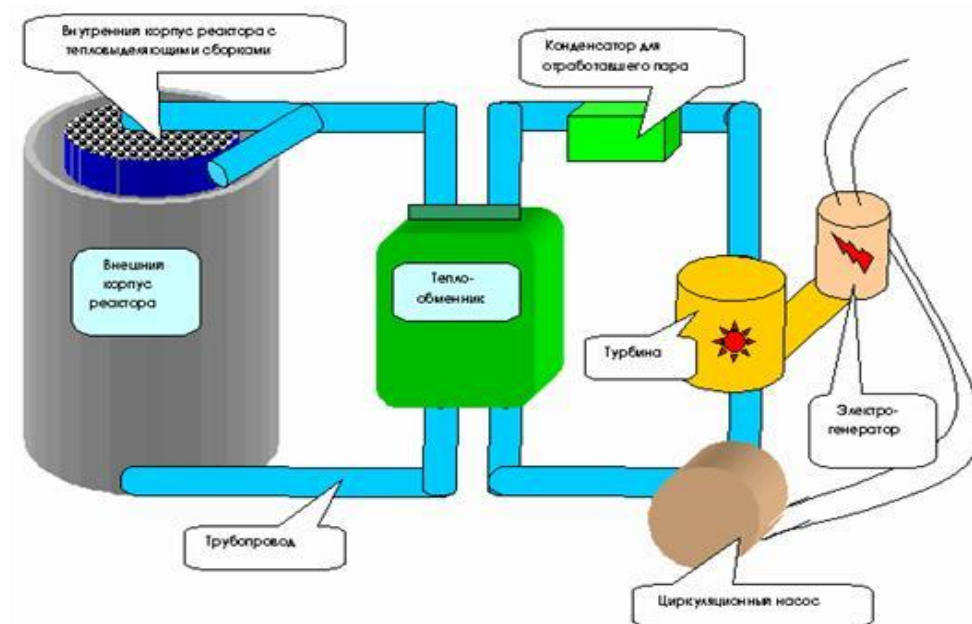


Рис.26. Схема реактора ВВЭР

Как видно из схемы, он имеет два контура. Первый контур, реакторный, полностью изолирован от второго, что уменьшает радиоактивные выбросы в атмосферу. Циркуляционные насосы (насос первого контура на схеме не показан) прокачивают воду через реактор и теплообменник (питание циркуляционных насосов происходит от турбины). Вода реакторного контура находится под повышенным давлением, так что несмотря на ее высокую температуру (293 градуса - на выходе, 267 - на входе в реактор) ее закипания не происходит. Вода второго контура находится под обычным давлением, так что в теплообменнике она превращается в пар. В теплообменнике-парогенераторе теплоноситель, циркулирующий по первому контуру, отдает тепло воде второго контура. Пар, генерируемый в парогенераторе, по главным паропроводам второго контура поступает на турбины и, отдает часть своей энергии на вращение турбины, после чего поступает в конденсатор. Конденсатор, охлаждаемый водой циркуляционного контура (так сказать, третий контур), обеспечивает сбор и конденсацию отработавшего пара. Конденсат, пройдя систему подогревателей, подается снова в теплообменник.

Энергетическая мощность большинства реакторов ВВЭР в нашей стране - 1000 мегаватт (Мвт).

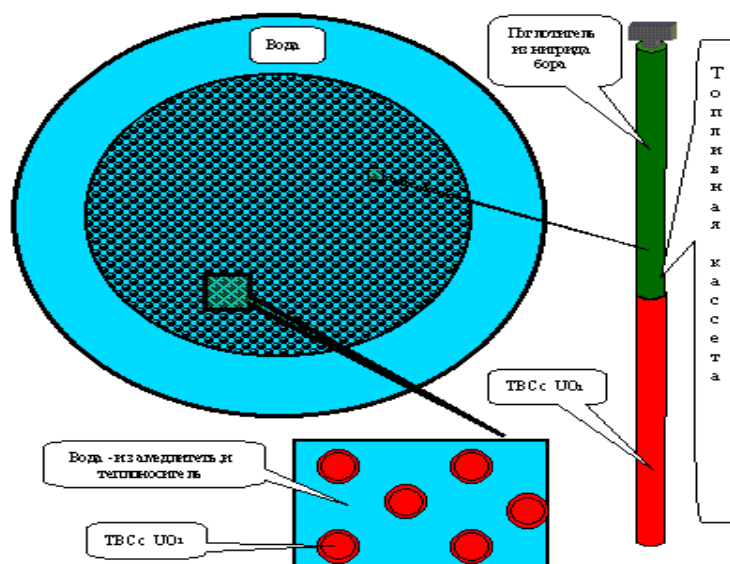


Рис.27. Строение активной зоны

Активная зона (рис.27) имеет прочный наружный стальной корпус, могущий в случае непредвиденных обстоятельств локализовать возможную аварию. Корпус полностью заполнен водой под высоким давлением. В середине активной зоны расположены ТВС с шагом в 20-25 см. Некоторые ТВС дополнены сверху поглотителем из бороциркониевого сплава и нитрида бора и способны находиться в активной зоне или бороциркониевой частью, или урановой - таким образом осуществляется регулирование цепной реакции. Вода подается в реактор снизу под давлением. Сверху реактор закрыт стальной крышкой, герметизирующей его корпус и являющейся биозащитой.

### Характеристика реакторов типа РБМК

РБМК (рис.28) построен по несколько другому принципу, чем ВВЭР. Прежде всего в его активной зоне происходит кипение - из реактора поступает пароводная смесь, которая, проходя через сепараторы, делится на воду, возвращающуюся на вход реактора, и пар, который идет непосредственно на турбину. Электричество, вырабатываемое турбиной, тратится, как и в реакторе ВВЭР, также на работу циркуляционных насосов.

Основные технические характеристики РБМК следующие. Активная зона реактора - вертикальный цилиндр диаметром 11.8 метров и высотой 7 метров (рис.29). По периферии активной зоны, а также сверху и снизу расположен боковой отрагатель - сплошная графитовая кладка толщиной 0.65 метра. Собственно активная зона собрана из графитовых шестигранных колонн (всего их 2488), собранных из блоков сечением 250х250мм. По центру каждого блока сквозь всю колонну проходят сквозные отверстия диаметром 114мм для размещения технологических каналов и стержней СУЗ.

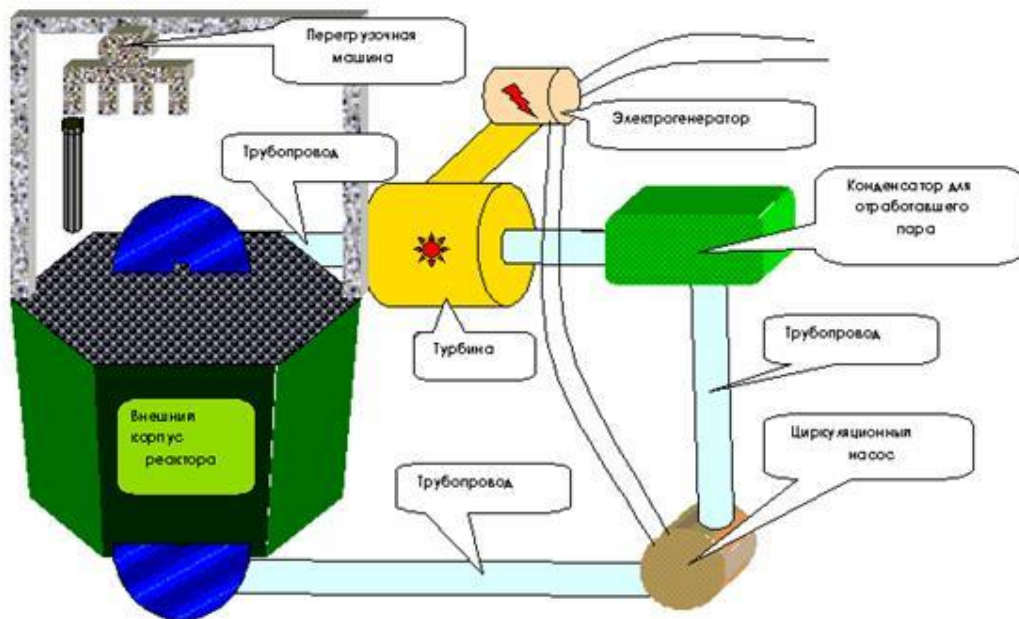


Рис.28. Схема реактора РБМК

Общее число технологических каналов в активной зоне 1693. Внутри большинства технологических каналов находятся тепловыделяющие кассеты, имеющие довольно сложную структуру. Кассета состоит из двух последовательно соединенных тепловыделяющих сборок (ТВС), длина каждой из которых 3,5м. ТВС содержит 18 стержневых твэлов - трубок наружным диаметром 13,5мм с толщиной стенки 0,9 мм, заполненных таблетками диаметром 11,5мм из двуоксида урана ( $UO_2$ ), крепежные детали из сплава циркония и несущий стержень из оксида ниобия. Стенки кассеты плотно фиксированы к графитовой кладке, а внутри кассет циркулирует вода. В остальных каналах расположены стержни системы управления защитой, которые состоят из поглотителя - бороциркониевого сплава. Некоторые каналы полностью изолированы от теплоносителя, и в них расположены датчики радиации (Матвеев, Рудик, 1990).

Электрическая мощность РБМК - 1000 Мвт. АЭС с реакторами РБМК составляют заметную долю в атомной энергетике. Так, ими оснащены Ленинградская, Курская, Чернобыльская, Смоленская, Игналинская АЭС.

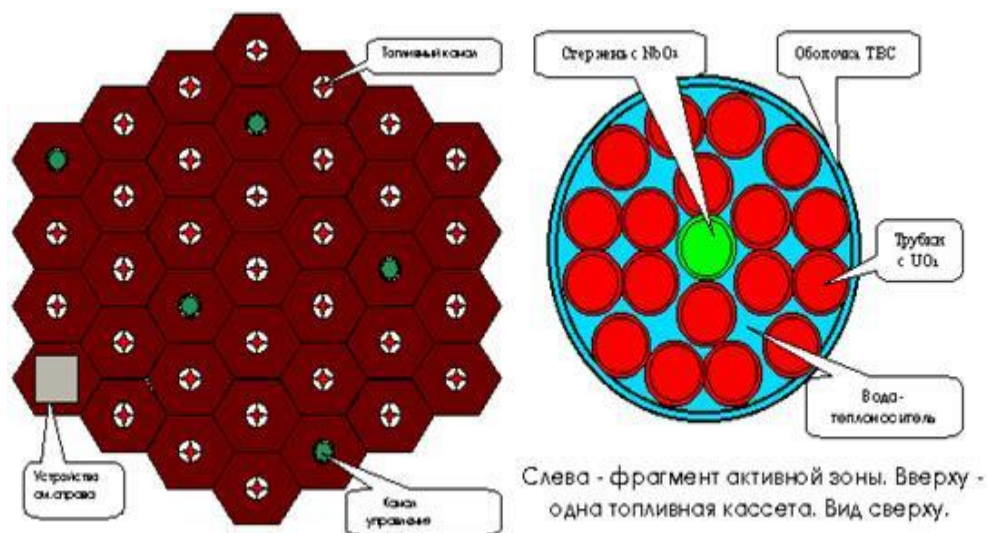


Рис.29. Активная зона реактора РБМК

Проводя сравнение различных типов ядерных реакторов, стоит остановиться на двух наиболее распространенных в нашей стране и в мире типах этих аппаратов: ВВЭР (Водо-Водяной Энергетический реактор) и РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный). Наиболее принципиальные различия: ВВЭР - корпусной реактор (давление держится корпусом реактора); РБМК - канальный реактор (давление держится независимо в каждом канале); в ВВЭР теплоноситель и замедлитель - одна и та же вода (дополнительный замедлитель не вводится), в РБМК замедлитель - графит, а теплоноситель - вода; в ВВЭР пар образуется во втором корпусе парогенератора, в РБМК пар образуется непосредственно в активной зоне реактора (кипящий реактор) и прямо идет на турбину - нет второго контура. Из-за различного строения активных зон параметры работы у этих реакторов также разные. Для безопасности реактора имеет значение такой параметр, как коэффициент реактивности - его можно образно представить как величину, показывающую, как изменения того или иного параметра реактора повлияет на интенсивность цепной реакции в нем. Если этот коэффициент положительный, то при увеличении параметра, по которому приводится коэффициент, цепная реакция в реакторе при отсутствии каких-либо других воздействий будет нарастать и в конце станет возможным переход ее в неуправляемую и каскадно нарастающую - произойдет разгон реактора. При разгоне реактора происходит интенсивное тепловыделение, приводящее к расплавлению тепловыделителей, стеканию их расплава в нижнюю часть активной зоны, что может

привести к разрушению корпуса реактора и выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду.

В реакторе ВВЭР при появлении в активной зоне пара или при повышении температуры теплоносителя, приводящего к снижению его плотности, падает количество столкновений нейтронов с атомами молекул теплоносителя, уменьшается замедление нейтронов, вследствие чего все они уходят за пределы активной зоны, не реагируя с другими ядрами. Реактор останавливается.

В реакторе РБМК при вскипании воды или повышении ее температуры, приводящее к снижению ее плотности, уходит ее нейтронопоглощающее действие (замедлитель в этом реакторе и так уже есть, а у пара коэффициент поглощения нейтронов гораздо ниже, чем у воды). В реакторе нарастает цепная реакция и он разгоняется., что, в свою очередь, приводит к дальнейшему повышению температуры воды и ее вскипанию.

Следовательно, при возникновении нештатных ситуаций работы реактора, сопровождающихся его разгоном, реактор ВВЭР заглухнет, а реактор РБМК продолжит разгон с нарастающей интенсивностью, что может привести к очень интенсивному тепловыделению, результатом которого будет расплавление активной зоны реактора.

Данное последствие очень опасно, так как при контакте расплавленных циркониевых оболочек с водой происходит разложение ее на водород и кислород, образующих крайне взрывчатый гремучий газ, при взрыве которого неизбежно разрушение активной зоны и выброс радиоактивных топлива и графита в окружающую среду. Именно по такому пути развивались события при аварии на Чернобыльской АЭС. Поэтому в реакторе РБМК как нигде важна роль защитных систем, которые будут или предотвращать разгон реактора, или экстренно его охлаждать в случае разгона, гася подъем температуры и вскипание теплоносителя. Современные реакторы типа РБМК оборудованы достаточно эффективными подобными системами, практически сводящими на нет риск развития аварии (на Чернобыльской АЭС в ночь аварии по преступной халатности в нарушение всех инструкций и запретов были полностью отключены системы аварийной защиты), но о подобной возможности следует помнить.

### **Реактор на тяжелой воде**

В Канаде и Америке разработчики ядерных реакторов при решении проблемы о поддержании в реакторе цепной реакции предпочли использовать в качестве замедлителя тяжелую воду. У тяжелой воды очень низкая степень поглощения нейтронов и очень высокие замедляющие свойства, превышающие аналогичные свойства графита.



Вследствие этого реакторы на тяжелой воде (рис.30) работают на необогащенном топливе, что позволяет не строить сложные и опасные предприятия по обогащению урана.

В принципе хорошо спроектированный и построенный реактор на тяжелой воде может работать долгие годы на естественном уране, нуждающемся лишь в выделении его из руды, и давать дешевую энергию. Но тяжелая вода очень дорога в производстве, и поэтому вследствие неизбежных утечек ее из трубопроводов суммарные затраты на эксплуатацию реактора возрастают и приближаются к аналогичным у РБМК и ВВЭР.

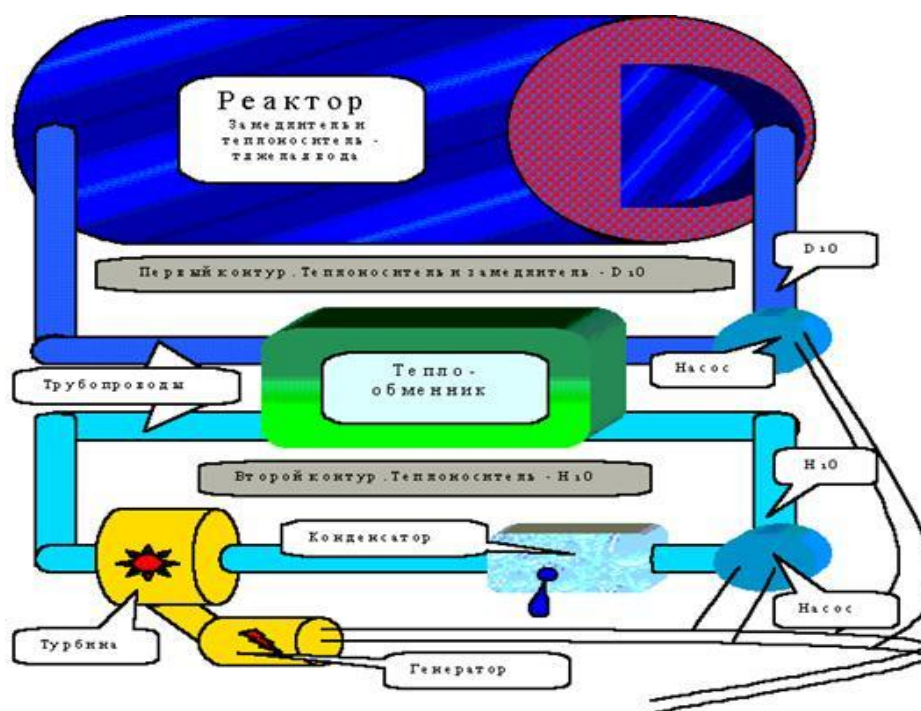


Рис.30. Схема реактора на тяжелой воде

В качестве теплоносителя первого контура может использоваться замедлитель - тяжелая вода, хотя имеются реакторы, где теплоноситель - легкая вода, а контуры циркуляции теплоносителя и замедлителя разделены.

Конструкция реактора во многом аналогична конструкции реактора ВВЭР.

### Реактор с шаровой засыпкой

В реакторе с шаровой засыпкой (рис.31) активная зона имеет форму шара, в который засыпаны тепловыделяющие элементы, также шарообразные. Каждый элемент представляет из себя графитовую сферу, в которую вкраплены частицы оксида урана. Через реактор прокачивается газ - чаще всего используется углекислота  $CO_2$ . Газ подается в активную зону под давлением и впоследствии поступает на теплообменник. Регулирование реактора осуществляется стержнями из поглотителя, вставляемыми в активную зону.

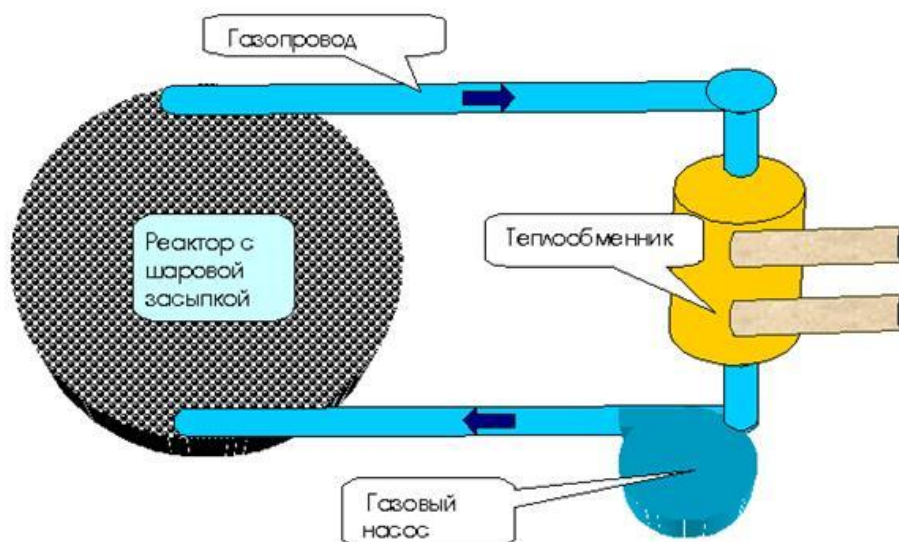


Рис.31. Схема реактора с шаровой засыпкой

Экстренное глушение реактора осуществляется путем выстреливания в активную зону клина из поглотителя (рядом с реактором устраивают некое подобие короткой пушки, которая в экстраординарной ситуации выстреливает в реактор через его корпус клинообразный кусок поглотителя, при этом реактор сразу останавливается). Реактор с шаровой засыпкой выгодно отличается тем, что в нем принципиально не может произойти взрыв гремучего газа, и в случае разгона реактора самым неприятным последствием будет лишь расплавление тепловыделяющих элементов и невозможность дальнейшей эксплуатации реактора. Взрыва такого реактора при его разгоне произойти не может в принципе. С другой стороны, в случае попадания воды в активную зону (например, из второго контура в случае прорыва трубы в теплообменнике) разрушение реактора и выброс радиоактивного газа-теплоносителя неизбежно.

Реакторы с шаровой засыпкой в незначительном количестве строились в Восточной Европе и Америке.

### **Реактор на быстрых нейтронах**

Реактор на быстрых нейтронах (рис.32) очень сильно отличается от реакторов всех остальных типов. Его основное назначение - обеспечение расширенного воспроизводства делящегося плутония из урана-238 с целью сжигания всего или значительной части природного урана, а также имеющихся запасов обедненного урана. При развитии энергетики реакторов на быстрых нейтронах может быть решена задача самообеспечения ядерной энергетики топливом.



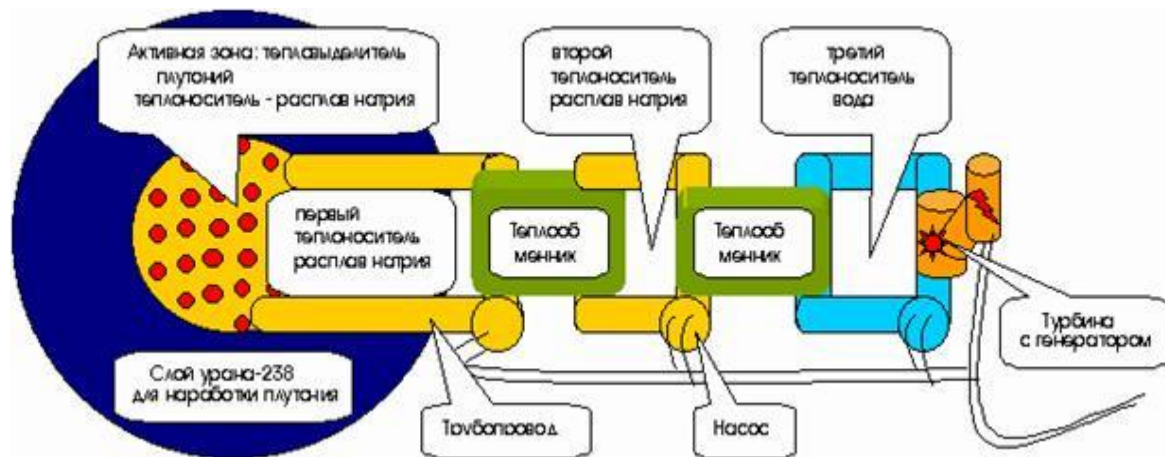


Рис.32. Схема реактора на быстрых нейтронах

Прежде всего, в реакторе на быстрых нейтронах нет замедлителя. В связи с этим в качестве топлива используется не уран-235, а плутоний и уран-238, которые могут делиться от быстрых нейтронов. Плутоний необходим для обеспечения достаточной плотности нейтронного потока, которую не может обеспечить один уран-238. Тепловыделение реактора на быстрых нейтронах в десять-пятнадцать раз превосходит тепловыделение реакторов на медленных нейтронах, в связи с чем вместо воды (которая просто не справится с таким объемом энергии для передачи) используется расплав натрия (его температура на входе - 370 градусов, а на выходе - 550, что в десять раз выше аналогичных показателей, скажем, для ВВЭР - там температура воды на входе - 270 градусов, а на выходе - 293) (Матвеев, Рудик, 1990).

Опять-таки в связи с большим тепловыделением приходится оборудовать даже не два, а три контура (объем теплоносителя на каждом последующем, естественно, больше), причем во втором контуре используется опять-таки натрий. При работе такого реактора происходит очень интенсивное выделение нейтронов, которые поглощаются слоем урана-238, расположенного вокруг активной зоны. При этом этот уран превращается в плутоний-239, который, в свою очередь, может использоваться в реакторе как делящийся элемент. Плутоний используется также в военных целях.

В настоящее время реакторы на быстрых нейтронах широкого распространения не получили, в основном из-за сложности конструкции и проблемы получения достаточно устойчивых материалов для конструкционных деталей. В России имеется только один реактор такого типа (на Белоярской АЭС). Считается, что такие реакторы имеют большое будущее.

## Основные радиоактивные продукты ядерного деления

**Йод (I).** Природный йод - химический элемент 7 группы периодической системы Д. И. Менделеева атомная масса 126,9, галоген. Содержание в земной коре  $3 \cdot 10^{-5}\%$ . Находится в природе почти повсеместно преимущественно в виде йодистых натрия, кальция, магния, но крайне рассеянно. Радиоактивный йод-131 является одним из молодых продуктов деления ядер, имеет период полураспада 8,04 суток. Йод-131 распадается с испусканием сложного  $\beta$ -спектра основные два из пяти его составляющих обладают максимальными энергиями 0,334 МэВ (7%) и 0,606 МэВ (89,2%), а составляющая спектра с наиболее высокой энергией  $E_{\beta} = 0,807$  МэВ. Спектр  $\gamma$ -излучения йода-131 состоит из 15 линий (включая  $\gamma$ -излучение дочернего ксенона) с энергией от 0,08 до 0,723 МэВ.

Йод -131 реагирует со многими веществами, образуя йодаты, перйодаты и йодиды. В радиоактивных выпадениях 75% йода находится в форме аэрозолей и 25% в форме паров.

Природный йод состоит из одного стабильного изотопа. Известны также 24 радиоактивных изотопа йода с массовыми числами в интервалах 117 - 126, 128 - 139. Все они искусственные и являются продуктами ядерных реакций. Образуются при делении тяжелых ядер урана и плутония.

В «свежих» выпадениях радиоактивных осадков вначале опасны йод-131, -132, -133, -135, через неделю йод-131 и 132 и через две недели только йод-131. Радиоизотопы йода могут поступать в организм через органы дыхания, пищеварения, кожу, конъюнктиву, раны.

Из организма животных и птиц радиоактивный йод, как и стабильный, выводится преимущественно почками с мочой, через желудочно-кишечный тракт с калом, а у продуктивных животных - с молоком, у птиц - с яйцом. При длительном поступлении  $^{131}\text{I}$  курам-несушкам с кормом в желток яйца переходит до 16%, а в белок - около 1% поступившей суточной дозы. У лактирующих коров с 1 литром молока выделяется около 1% поступившего в организм за день йода-131. При выпасе коров на территории, однократно загрязненной йодом-131, пик выведения его с молоком приходится на третьи сутки, затем наступает спад и через три недели выведение сокращается в 4 раза.

Йод является активным биогенным элементом, при попадании в организм он полностью всасывается в кровь и до 60% его откладывается в щитовидной железе.

Токсическое действие радиоактивного йода прежде всего - в поражении щитовидной железы. Происходит ее нарушение и замещение паренхимы железы соединительной тканью. Появляются признаки недостаточности функции железы: потеря аппетита, угнетение, запоры, шелушение кожи и высыхание шерсти. Возникают существенные

изменения в нервной и эндокринной системах. Изотопы йода в заметных количествах накапливаются в легких и обуславливают возникновение бронхитов и пневмоний. По мере нарастания патологических изменений в щитовидной железе развивается микседема, а именно: снижается температура тела, повышается нервная возбудимость, увеличивается проницаемость сосудов.

Структурные и функциональные изменения в органах при попадании в организм радиоактивного йода в основном являются результатом нарушения эндокринной регуляции, как следствия поражения щитовидной и паращитовидной желез.

**Стронций (Sr).** Природный стронций – химический элемент 2 группы периодической системы Д. И. Менделеева., атомная масса 87,63, щелочно-земельный металл. Природный стронций состоит из 4 стабильных элементов и широко распространен в природе. В земной коре его содержится 0,04%. Стронций является постоянной составной частью растений и животных. В растениях до 92,8% он концентрируется в надземных частях. Переход стронция из почвы в растения во многом зависит от количества доступного кальция. Способность концентрировать стронций обладают морские растения.

Из радиоактивных изотопов стронция, образующихся при делении ядер тяжёлых элементов, наиболее важное эколого-биологическое значение имеет стронций-90. Стронций-90 – радиоактивный продукт расщепления урана, долгоживущий изотоп, его период полураспада равен 28,1 годам. Он является бета-излучателем. Энергия его  $\beta$ -излучения равна 0,546 МэВ,  $\gamma$ -излучение отсутствует. Претерпевая радиоактивный распад, стронций-90 превращается в дочерний радиоактивный изотоп иттрий-90 с периодом полураспада 64,3 ч. В случаях попадания в организм 90 биологическое действие его обусловлено бета-частицами, испускаемыми им самим и его дочерним продуктом иттрием-90. По типу распределения радиоактивный стронций и иттрий относятся к скелетным (остеотропным) изотопам.

Сорбция и миграция в почвах стронция-90 определяется закономерностями поведения стабильного стронция, а также химического аналога - стабильного кальция. На распределение стронция между жидкой и твердой фазами почв влияет влажность, содержание обменных кальция и магния, емкость обмена, содержание органического вещества, pH. Механизм сорбции стронция-90 твердой фазой почв - ионообменный. Сорбция стронция-90 твердой фазой почв во многом зависит от присутствия катионов в растворе в больших концентрациях. Так, при внесении в почву больших количеств ионов Са происходит резкое снижение отношения стронция-90 к кальцию в почвенном растворе, что способствует уменьшению накопления стронция-90 растениями. При увеличении в

почве концентрации анионов стронций закрепляется в почвах за счет образования труднорастворимых соединений. Предпочтительнее стронций-90 сорбируется асканитом, бентонитом, вермикулитом, флогопитом и др. Глинистая фракция почв может сорбировать 99 % стронция-90. На поведение стронция-90 в почве оказывает большое влияние органическое вещество почвы. Миграция стронция-90 в значительной степени определяется количеством и качественным составом гумуса, Стронций-90 присутствует в почвах в форме сложных комплексов, в состав которых входят органические вещества, гумусовые кислоты, а также кальций, железо и алюминий. В зависимости от растворимого или нерастворимого их состояния возрастает или уменьшается доля подвижного стронция-90 в почвах. Увеличить содержание необменных форм стронция можно внесением в почву фосфорных удобрений и извести от 1,5 до 4 раз.

Средний пробег бета-частиц инкорпорированного в ткани животного стронция-90 составляет 0,5 мм, иттрия-90 - 4мм. В костной ткани ввиду её высокой плотности в сравнении с мягкими тканями пробег бета-частиц будет короче. В связи с этим большая часть энергии бета-частиц радиоактивного стронция и иттрия, фиксированных в скелетной части поглощается костной тканью и костным мозгом.

Особенность действия стронция-90 состоит в том, что он, депонируясь в скелете, присутствует там достаточно длительное время, постоянно облучая ткани, и в связи с этим изменения в костной ткани и костном мозге проявляются значительно в большей степени, чем в других органах и тканях организма. Однако развитие патологических процессов происходит и в других внутренних органах через отражённые реакции, а не только в результате непосредственного действия излучения.

Большие дозы стронция-90 вызывают лучевую болезнь острого и подострого характера течения. При длительном поступлении в организм стронция-90 даже в относительно малых дозах тоже может развиваться лучевая болезнь или же обнаруживаться радиационные поражения в виде торможения роста, укорочения продолжительности жизни и других последствий. Компенсаторные и восстановительные процессы при хроническом поражении стрнцием-90 выражены слабо. Клинические и патоморфологические признаки лучевой болезни, вызванной стронцием-90, во многом сходны с таковыми, вызванными внешним облучением.

**Цезий (Cs)** - химический элемент I группы периодической системы Д. И. Менделеева. Щелочной металл. Атомная масса 132,91. В природе существует один стабильный изотоп <sup>133</sup>Cs. В земной коре содержание его составляет 7-10<sup>-4</sup> весовых процентов. Встречается

главным образом в рассеянном состоянии в минералах лепидолите и карналлите. Образует и самостоятельные минералы поллуцит и родицит.

В разных почвах действие цезия различно: в глинистых, выщелоченных, обедненных калием, он закрепляется прочно и плохо поступает в корни растений. В почвах, богатых органикой, хорошо усваивается корневой системой растений (частично этому способствует большая обменная катионная емкость органических почв). Цезий легко передвигается в самих растениях. Накапливается в лишайниках (иногда в 10 раз больше, чем в растениях юга), осоке, хвощах. Среднее содержание его в растениях примерно 0,0022 % сухого вещества. В значительных количествах он накапливается в организме беспозвоночных животных - 0,0138 % (на сухое вещество), в организме позвоночных его в 4 раза меньше. Цезий поступает в организм животных преимущественно с растительной пищей, легко всасывается в желудочно-кишечном тракте (50 - 80 %) и свободно циркулирует по всему телу. Основная часть его депонируется в мышцах (80%) и костях (около 8%). Причем более активные мышцы поглощают цезия в больших количествах. У лактирующих животных значительная доля цезия переходит в молоко, у кур - в яйца. Выводится из организма с мочой и калом. Жвачные выводят цезий в больших количествах, чем другие животные. Из пищевых продуктов цезием богаты хлеб, картофель, различная зелень. При парентеральном введении в организм выведение его с мочой и калом значительно увеличивается при обогащении рациона калием, и наоборот, снижение содержания калия в рационе приводит к снижению выведения цезия. У разных видов животных уровни накопления различные. Например, в тканях коровы цезия значительно больше, чем в тканях овцы, поскольку масса мягких тканей у коровы примерно в 7 раз больше.

Радиоактивный изотоп  $^{137}\text{Cs}$  -  $\beta$ -излучатель. Период полураспада 30,17 года. Распадается с испусканием двухкомпонентного  $\beta$ -спектра.  $E_{\beta 1} = 511,7$  кэВ (94,8 %),  $E_{\beta 2} = 1173,4$  кэВ (5,2 %). Максимальная энергия 0,52 МэВ, средняя 179 кэВ. Этому излучению сопутствует  $\gamma$ -излучение, испускаемое дочерним радиоактивным барием, с энергией 661,662 кэВ и рентгеновские лучи с энергией 32-36,5 кэВ.

Цезий-137 один из дозообразующих радионуклидов среди продуктов деления. Он относится к числу наиболее подвижных радиоизотопов в биологических цепях. Это связано с тем, что цезий является химическим аналогом калия. Радиоизотопы цезия помимо ионообменного связывания способны к необменной сорбции твердой фазой почв. На фиксацию ионов цезия влияет концентрация, ионный состав, рН почвенного раствора, а также минералогический состав почвы, особенности структуры, формы, размер частиц, минералов, их содержание в почве. Наибольшее количество цезия сорбируется илистой

фракцией почв. По снижению прочности закрепления цезия-137 почвенные минералы располагаются в следующий ряд: асканит, гидрофлогопит, флогопит, гумбирин, вермикулит, бентонит, каолинит, вивианит, гидрогетит, биотит, мусковит. На сорбцию цезия-137 почвами существенное влияние оказывает калий. Замещение всех обменных катионов почвы калием заметно увеличивает сорбцию цезия-137. Чем выше содержание стабильного цезия в системе "почва-раствор", тем меньше цезия-137 сорбируется почвой. Минеральные и органические удобрения, а также известь усиливают прочность закрепления цезия-137 в почвах. Увеличение pH вызывает усиление поглощения цезия-137 почвами. В почвах легких по гранулометрическому составу содержание цезия-137 в обменной форме выше, чем необменной и прочно связанной.

Поскольку цезий при попадании в организм циркулирует по всему телу, дозы облучения всех органов примерно одинаковы, и поэтому возможны генетические и соматические повреждения. Влияние  $^{137}\text{Cs}$  на продолжительность жизни и другие эффекты одинаково при разных путях поступления в организм. При попадании на кожу  $^{137}\text{Cs}$  всасывается по кровеносным и лимфатическим капиллярам, период полувыведения его из кожи равен одним суткам. Период полувыведения  $^{137}\text{Cs}$  из организма различен у разных видов животных; например, у собак он равен 42 сут, а у крыс 6 сут. При инкорпорации Cs в организме возможно развитие лейкемии, рака молочной железы и печени, подавление лимфоидного кроветворения, угнетение функции костного мозга, опухоли кожи.

Допустимые уровни активности  $^{137}\text{Cs}$  в открытых водоемах 555 Бк/л, воздухе рабочей зоны - 0,52 Бк/л, в атмосферном воздухе - 40,02 Бк/л.

### **Загрязнение природной среды при эксплуатации АЭС**

Принципиальной особенностью работы АЭС является использование для получения энергии ядерного топлива, в остальном же это типичная тепловая станция, характеризующаяся комплексом нерадиационных факторов, оказывающих воздействие на экологическую обстановку. В АЭС, также как и в тепловых станциях, энергетический пароводяной цикл осуществляется по схеме: парогенератор - турбина - конденсатор - парогенератор. В конденсаторах происходит превращение пара в воду, в результате чего возникает необходимость отвода большого количества тепла. Для рассеивания тепла, поступающего от электростанции, применяются прямоточные (сброс воды в реки, участки морей, крупные водоемы) или оборотные системы водоснабжения – использование охлаждающей воды в прудах-охладителях и внутренних водоемах.

Важно учитывать, что возможное действие ионизирующего излучения на биоту районов АЭС практически проявляется не изолированно, а совместно с другими факторами загрязнения окружающей среды.

Наиболее отчетливо это видно на примере экосистем водоемов охладителей, подверженных влиянию теплового сброса, химического загрязнения, эвтрофирования, механического травмирования организмов в водозаборных устройствах АЭС.

*Тепловое загрязнение.* Температура является важным абиотическим фактором среды, управляющим структурой и метаболизмом экосистем. Сброс подогретых вод приводит к изменению физико-химических свойств воды: плотность, вязкость, поверхностное натяжение, растворимость газов. Вследствие повышенного испарения происходит изменения водного баланса водоемов. Тепловой сброс обуславливает также возникновение дефицита кислорода в придонных областях водоемов. Повышенная температура воды оказывает значительное воздействие на биологические процессы в водоеме – ускоряет разложение органических остатков, благоприятствует замене обычной популяции флоры на менее желательные сине-зеленые водоросли. Вследствие понижения уровня кислорода в теплой воде возникают заморные зоны, повышенная температура стимулирует зарастание водоемов растительностью, т.е. обуславливает процессы заболачивания.

При производстве 1 Квт/ч. электроэнергии на тепловых станциях тепловые сбросы составляют 135-400 Ккал, на АЭС 130-1990 Ккал. Для рассеивания этого тепла необходима водная поверхность 0,6 га на 1 Мвт энергии или 1800 га для АЭС мощностью в 3000 Мвт.

*Химическое загрязнение.* При эксплуатации АЭС в водоемы охладители поступают химические загрязнители: смазочные материалы, тяжелые металлы (медь, никель, хром, цинк, продукты коррозии других металлов), детергенты, щелочи, кислоты и их соли. В водоем могут поступать также бытовые загрязнения населенных пунктов, расположенных на берегу водоема – охладителя. В сочетании с тепловым сбросом от АЭС это приводит к нарушению экологического равновесия.

Результаты исследований водоемов – охладителей различных АЭС указывают на необходимость учета при выборе площадок АЭС географических и гидробиологических особенностей водоемов – охладителей, которые могут рассматриваться в качестве факторов, ограничивающих предельно допустимую мощность АЭС. При многоцелевом использовании таких водоемов должны быть установлены жесткие ограничения на допустимый сброс загрязнителей в подогретые воды.

*Биологическое загрязнение.* Наиболее показательным индикатором изменения водоемов-охладителей АЭС является эвтрофирование вследствие подогрева воды.

В связи с этим беспокойство вызывает интенсивное развитие сине-зеленых водорослей, продукты метаболизма и распада которых оказывают токсическое действие на гидробионтов, а сами водоросли являются несъедобными для большинства видов зоопланктона и рыб.

Массовое размножение сине-зеленых водорослей является причиной биологического загрязнения прибрежной акватории. Высокое содержание в водах лабильного органического вещества создает условия для развития микрофлоры в том числе патогенных форм, например бактерий кишечной группы. Водоем теряет рекреационное значение, падает его рыбохозяйственный статус.

Результаты исследований водоемов-охладителей различных АЭС указывают на необходимость учета при выборе площадок АЭС географических и гидробиологических особенностей водоемов-охладителей, которые могут рассматриваться в качестве факторов, ограничивающих предельно допустимую мощность АЭС. При многоцелевом использовании водоема-охладителя должны быть установлены жесткие ограничения на допустимый сброс загрязнителей и подогрев воды.

Для обеспечения охраны природной среды необходима разработка региональных экологических нормативов, учитывающих необходимость ограничения воздействия АЭС на окружающую среду.

#### **Радиоэкологический контроль при снятии АЭС с эксплуатации**

Прекращение эксплуатации энергоблока АЭС может быть связано либо с радиационной аварией, сопровождавшейся такими разрушениями, при которых его восстановление экономически нецелесообразно, либо выработкой ресурса реакторной установки энергоблока.

Ориентировочный срок эксплуатации реакторной установки составляет 30 - 40 лет. После удаления облученного топлива и охлаждающей воды, (на легководных реакторах) свыше 95 % остаточных радиоактивных продуктов приходится на корпус реактора и элементы конструкции, входящие в состав его непосредственного окружения.

Система радиационного контроля, существующая на действующей АЭС, в связи с прекращением эксплуатации энергоблока может подвергнуться модификации в зависимости от конкретных условий, сложившихся на АЭС, радиационной обстановки и методологии проводимых на энергоблоке работ.

Если выход энергоблока из строя связан с радиационной аварией, система радиационного контроля переходит на аварийный режим работы.



Если же энергоблок остановлен в связи с выработкой ресурса реакторной установки, то система радиационного контроля за состоянием окружающей среды в окрестностях АЭС, продолжает функционировать в том же объеме, что и при нормальной эксплуатации атомной электростанции, даже если АЭС состоит из одного энергоблока, снимаемого с эксплуатации.

После остановки и расхолаживания реактора перед началом работ по демонтажу или консервации реакторной установки, как правило, производится выдержка для уменьшения активности этой зоны за счет радиоактивного распада короткоживущих изотопов. Продолжительность выдержки определяется оптимальным соотношением между уменьшающимися со временем затратами на защитные мероприятия при демонтаже или консервации реактора и растущими со временем затратами на инспекции, техобслуживание остановленного реактора, его охрану и потерь за счет вывода из пользования охраняемой территории.

В зависимости от конкретных условий и мощности реактора демонтаж может происходить в несколько этапов.

На первом этапе производится удаление всех легкодоступных радиоактивных материалов, а технологическое оборудование, узлы и конструкции реакторной установки оставляются нетронутыми. В этом случае персонал, осуществляющий техобслуживание и контроль реакторной установки, продолжает выполнять свои функции по-прежнему. В окружающей среде в процессе удаления радиоактивных материалов возможно появление повышенных концентраций радиоактивных продуктов, поэтому в этот период радиационный контроль проводится более тщательно.

На втором этапе оставляются и опечатываются те части реакторной установки, которые сохраняют высокие уровни радиоактивности. Менее радиоактивные части демонтируются и удаляются, обычно это активированное оборудование и облицовочные слои бетона. При этих работах возможно образование высоких концентраций радиоактивной пыли, а при пылеподавлении орошением - радиоактивных активных сточных вод. В районе проведения работ радиометрический контроль при этом осуществляется непрерывно, а в окрестностях АЭС - ежедневно. После завершения работ и стабилизации радиационной обстановки радиометрический контроль восстанавливается в том же объеме и в том же режиме, что и при нормальной эксплуатации АЭС.

При окончательном демонтаже реакторной установки производится удаление всех радиоактивных материалов, содержание радиоизотопов в которых выше допустимого уровня. Большая часть реакторной установки, в частности узлы активной зоны,

теплообменники, трубопроводы, из-за высокой активности демонтируются с помощью дистанционно управляемого оборудования. Чтобы уменьшить образование высокоактивной пыли и паров металлов при демонтаже оборудования реакторной установки, часть работ производится под водой в корпусе реактора.

При всех этих работах образуется большое количество радиоактивных отходов. Так, по приблизительным оценкам, в результате демонтажа легководного реактора мощностью 1000 МВт образуется несколько сотен кубометров радиоактивных отходов. Эти радиоактивные отходы подлежат захоронению вместе с отходами, образующимися при нормальной работе АЭС, и такое же количество отходов, активность которых требует специальных способов захоронения, например, глубоко под землей в выработанных сухих шахтах.

Кроме того, при полном демонтаже образуется примерно 50 тыс. м<sup>3</sup> нерадиоактивных отходов, в том числе условно нерадиоактивных, активность которых не превышает установленных критериев. Непосредственной угрозы здоровью людей эти отходы не представляют, но их использование в хозяйственной деятельности за пределами АЭС и санитарно-защитной зоны недопустимо. Такое использование со временем может привести к широкомасштабному спонтанному повышению содержания радиоактивных продуктов в самых различных объектах, где эти отходы могут использоваться, что нежелательно, поскольку приводит к трудно предсказуемым последствиям. Например, использование условно нерадиоактивных отходов при планировке территорий может со временем в результате естественной миграции радионуклидов в ландшафте привести к накоплению долгоживущих изотопов на отдельных участках, соответствующих геохимическим барьерам, до опасных уровней вследствие возможности проникновения по пищевым цепочкам в рацион населения.

В процессе работ по полному демонтажу реакторной установки, несмотря на принимаемые предохранительные меры, образуется большое количество радиоактивной пыли, паров и газов, возможны протечки и проникновение в окружающую среду радиоактивных вод, разнос радиоактивного загрязнения движущимся транспортом и строительными механизмами, используемыми в процессе демонтажа.

Поэтому в районе работ организуется тщательный непрерывный контроль за радиационной обстановкой, зона работ в обязательном порядке огораживается, выходящий транспорт и механизмы контролируются и при необходимости дезактивируются.

В период демонтажа в окрестностях АЭС на стационарных пунктах контроля производятся ежедневные измерения уровней радиации и отбор суточных проб

радиоактивных выпадений и аэрозолей. Периодически, не реже одного раза в неделю, проводится маршрутная радиометрическая съемка дорог, по которым может двигаться транспорт, выходящий из зоны работ, и территория гаражей и стоянок этого транспорта. С той же периодичностью контролируется содержание радиоактивных продуктов во всех видах и источниках местных стоков, в том числе в ливневых стоках в водные системы, а также в отходах (илах) местных очистных сооружений бытовых вод и промстоков.

Транспортировка радиоактивных отходов к местам их захоронения производится с соблюдением всех мер защиты окружающей среды от загрязнения. Тем не менее, следует учитывать возможность такого загрязнения и контролировать чистоту транспортной магистрали каждый раз после перевозки по ней отходов высокой активности посредством маршрутной гамма-съемки с движущегося транспортного средства.

Места долговременного хранения высокоактивных отходов в течение сотен лет являются потенциальными источниками возможного радиоактивного загрязнения природной среды. По мере естественного старения материалов, стенок емкостей могильников, защитных оболочек контейнеров с отходами, блоков, отвержденных отходов будет происходить их постепенное разрушение в результате воздействия внешних факторов и внутренних физико-химических процессов, сопровождающееся проникновением радиоактивных продуктов в окружающую среду. Поэтому места захоронения радиоактивных отходов должны находиться под постоянным радиометрическим контролем. Радиометрическая съемка территории вблизи могильника производится каждый раз при загрузке радиоактивных отходов в могильник, причем измерения производятся два раза, до и после загрузки отходов. При случайном загрязнении территории в случае необходимости производится ее дезактивация. В перерывах между загрузками радиометрическая съемка производится периодически, не реже одного раза в месяц. С такой же периодичностью контролируется концентрация радиоактивных продуктов в грунтовых водах, отбираемых из водоносных горизонтов через скважины, пробуренные с учетом результатов гидрогеологических изысканий.

После консервации могильника в связи с его заполнением радиометрический контроль продолжает осуществляться ежемесячно в прежнем объеме.

Необходимо также следить за изменениями гидрологического режима прилегающей местности, техногенными изменениями геологических структур и возможностью возникновения деформаций могильников вследствие оползней, сейсмической активности и других опасных явлений, которые могут привести к проникновению природных вод в

могильник и, как следствие, к рассеянию радиоактивных продуктов в ландшафте и широкомасштабному загрязнению окрестных рек, водоемов и артезианских скважин.

Для контроля за изменениями гидрогеологического режима местности администрация АЭС привлекает специализированные организации других ведомств.

Полный демонтаж реактора большой мощности, выработавшего свой ресурс или подвергнувшегося разрушениям в результате аварии, может оказаться экономически нецелесообразным при достигнутом к тому времени уровне развития технологии. В этом случае производится консервация реакторной установки с предварительным удалением топлива и теплоносителя, если это возможно. Консервация производится путем возведения специального защитного укрытия вокруг реакторной установки или даже вокруг всего разрушенного при радиационной аварии энергоблока, как это имело место на Чернобыльской АЭС.

Если остаточная активность реакторной установки велика, то вследствие радиоактивного распада выделяется такое количество тепла, которое требует оставления вентиляционных отверстий в стенах укрытия или даже организации специального теплосъема. При этом укрытие становится постоянным возможным источником радиоактивных аэрозолей. Большие температурные градиенты могут со временем привести к появлению трещин в укрытии, поэтому за его состоянием необходим постоянный надзор, сопровождающийся тщательным непрерывным радиометрическим контролем с помощью датчиков, расположенных как на самом укрытии, так и за его пределами, на прилегающей территории. В окрестностях АЭС радиометрический контроль в этом случае осуществляется так же, как и при открытом демонтаже реакторной установки.

Если количество тепла, выделяющегося при радиоактивном распаде в активной зоне, может сбалансироваться естественным теплоотводом окружающих грунтов и горных пород, укрытие может быть сделано полностью герметичным. В этом случае после окончания работ по герметизации радиометрический контроль в районе захоронения реакторной установки осуществляется так же, как и в районе подвергнувшегося консервации могильника радиоактивных отходов.

После завершения всех работ по полному демонтажу реакторной установки и ее полной герметизации в обязательном порядке проводится подробная радиометрическая съемка окрестной местности с составлением карт содержания в почве долгоживущих изотопов. Для съемки администрация АЭС привлекает аэрогамма-спектрометрические средства контроля других ведомств. Результаты съемки представляют собой новый радиоактивный фон, т. е. новую точку отсчета, сравнение с которой при последующих

измерениях позволит судить об изменениях радиационной обстановки при долговременных наблюдениях.

Таким образом, основные принципы радиационного контроля при снятии энергоблоков АЭС с эксплуатации заключаются в следующем.

1. Объем радиационного контроля во внешней среде за пределами промплощадки АЭС зависит от состояния снимаемого с эксплуатации блока АЭС и конкретных условий расположения площадки. Он определяется и корректируется службой радиационного контроля окружающей среды АЭС и промышленной санитарной лабораторией в соответствии с их Положениями, закрепляется в их планах-графиках проведения радиационного контроля, которые утверждаются и согласовываются с Госкомгидрометом России и другими органами в установленном порядке.

2. При снятии с эксплуатации энергоблоков АЭС и при наличии на промплощадке других действующих блоков объем радиационного контроля во внешней среде не может быть уменьшен по сравнению с объемом радиационного контроля при нормальной эксплуатации энергоблоков АЭС.

3. Решение о прекращении радиационного контроля во внешней среде вокруг промплощадки АЭС во всех случаях может быть принято только после подробного обоснования возврата территории промплощадки АЭС для неограниченного использования в народном хозяйстве, что оформляется отдельным актом в установленном порядке.

4. Если на промплощадке АЭС все энергоблоки находятся на стадии снятия с эксплуатации, то:

- при наличии остановленных, но не разгруженных от ядерного топлива блоков радиационный контроль за внешней средой производится в том же объеме, что при нормальной эксплуатации;

- при разгруженных энергоблоках, находящихся на стадии консервации, периодичность радиационного контроля за внешней средой может быть уменьшена с обязательным обоснованием, в котором должна быть указана и согласована с местными органами Госсанэпиднадзора и Госкомгидромета России степень герметизации;

- при наличии на промплощадке АЭС энергоблоков на стадии захоронения в зависимости от местных гидрогеологических условий должен проводиться радиационный контроль грунтовых вод за пределами промплощадки АЭС;

- при производстве демонтажных работ на энергоблоках, снимаемых с эксплуатации, или при ликвидации энергоблока АЭС, что связано с транспортировкой радиоактивных демонтажных отходов в хранилища за пределами промплощадки, должен проводиться

контроль радиоактивного загрязнения дорог и прилегающей к ним территории на расстоянии до 100 м в обе стороны от дороги.

5. При транспортировке демонтажных отходов энергоблока АЭС в специальных контейнерах и спецтранспорте должен быть дополнительно установлен радиационный контроль загрязнения контейнеров и спецтранспорта на выезде с территории производства демонтажных работ и мест хранения демонтажных отходов.

6. При производстве широкомасштабных дезактивационных работ в период снятия с эксплуатации энергоблоков АЭС периодичность контроля радионуклидного состава жидких сред, удаляемых с АЭС, должна быть увеличена в зависимости от объемов, продолжительности дезактивационных работ и типа дезактивируемых помещений и оборудования.

7. При ограниченном повторном использовании в народном хозяйстве части демонтажных отходов, образующихся при снятии с эксплуатации энергоблоков (металл, бетон, песок и т. п.), должен проводиться входной - выходной радиационный контроль их объемной активности для соблюдения соответствующих нормативов на всех этапах схемы движения и переработки демонтажных отходов, включая места использования готовой продукции. На местах использования продукции из материалов рецикла и в зависимости от ее вида проводится выборочный радиационный контроль мощности дозы внешнего гамма-излучения не реже одного раза в полгода.

### **Вопросы и задания**

1. Какой принцип действия ядерного реактора.
2. Какие особенности конструкции ядерного реактора ВВЭР
3. Какие особенности конструкции ядерного реактора РБМК
4. Какие особенности конструкции ядерного реактора на тяжелой воде
5. Какие особенности конструкции ядерного реактора с шаровой засыпкой и газовым контуром.
6. Какие особенности конструкции ядерного реактора на быстрых нейтронах.
7. Какие виды загрязнения природной среды имеются при эксплуатации АЭС
8. Как осуществляется радиоэкологический контроль при снятии АЭС с эксплуатации
9. В чем заключаются основные принципы радиационного контроля при снятии энергоблоков АЭС.

Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

## Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
4. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
6. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
7. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
8. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.

## Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## Лекция 11.

### Радиоэкологические проблемы ядерных аварий

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются радиоэкологические проблемы, возникающие при ядерных авариях и проблемы захоронения радиоактивных отходов.

**Ключевые слова.** Авария, Три-Майн-Айленд, Уиндскейл, Южный урал, Чернобыль, радиоактивные отходы, захоронение.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются вопросы к лекции и тесты

Существующий отечественный и зарубежный опыт ядерной энергетики свидетельствует, что система радиационной безопасности работающих АЭС и других объектов ядерной энергетики высокоэффективно и надежно защищает человека и биосферу от радиационного воздействия. Вклад радиационного облучения в индивидуальную популяционную дозу находится на уровне 0,1-1 мбэр в год т.е. около 0,1-1% дозы полученной от естественного радиационного фона.

К сожалению, хотя и предпринимаются необходимые меры для радиационной безопасности работы АЭС и предприятий по переработке ядерного топлива, число незапланированных утечек и аварийных ситуаций на этих объектах довольно-таки велико. По неполным данным за время эксплуатации объектов ядерной промышленности зарегистрировано свыше 300 аварий и утечек радионуклидов в атмосферу и другие объекты природной среды.

В отличие от радионуклидов, поступающих в окружающую среду при нормативных выбросах радионуклидный состав аварийных выбросов может существенно отличаться от нормативных по периоду полураспада, удельной активности, энергии излучения, токсичности, физико-химическим свойствам, биологической активности, что во многом предопределяет их поведение в природных и аграрных экологических системах.

В случае возникновения аварии выделяют несколько периодов, характеризующихся определенными особенностями с точки зрения воздействия радиоактивного выброса на окружающую среду.

Первый период. Характеризуется острым внешним и внутренним облучением вследствие ингаляционной инкорпорации радиоактивных продуктов распада в результате прохождения облака, содержащего радионуклиды.



Критическими звеньями в этот период являются население, сельскохозяйственные животные, находящиеся на выпасе. Продолжительность периода составляет от нескольких минут до нескольких суток.

Второй период. В этот период определяющее значение начинает приобретать внутренне облучение в первую очередь в результате аэрозольного загрязнения растительности радиоактивными изотопами йода, что приводит к загрязнению пищевых цепей и формированию значительных дозовых нагрузок на щитовидную железу сельскохозяйственных животных и соответственно к биологическим эффектам различной тяжести. Существенное значение в этот период может иметь и внешнее облучение населения, животных и наиболее чувствительных видов растений.

Воздействие, оказываемое на экосистемы радиоактивными выбросами атомных станций в данный период, может принимать различные формы, среди которых выделяются следующие:

- загрязнение природных экосистем и продукции агропромышленного производства, разрушающее структуру его использования;
- действие ионизирующего излучения, приводящее к появлению соматических последствий облучения в экосистемах;
- последствия, связанные с временной невозможностью проведения сельскохозяйственных работ.

Так в результате аварии на ЧАЭС продукция агропромышленного производства была загрязнена на больших территориях, вследствие чего, как в СССР, так и в странах Западной Европы были введены ограничения на ее использование, что имело тяжелые социально-экономические.

При оценке последствий аварий следует учитывать и то обстоятельство, что территории, на которых возможно нанесение прямых эффектов воздействия ионизирующего излучения весьма ограничены. Это подтвердили и результаты радиоэкологических последствий аварии на ЧАЭС, когда прямое радиационное поражение растений, в первую очередь хвойных лесов, и животных были обнаружены на сравнительно небольших территориях. В то же время загрязнение агроэкосистем были весьма широкомасштабны.

Чувствительность природных и аграрных экосистем к радиационному воздействию зависит от времени года. Так, например, радиочувствительность в весенне-летний период в несколько раз выше, чем в другие сезоны года, когда прекращается активный вегетативный период у растений.

Третий период. Характеризуется наличием значительной территории загрязнения долгоживущими радионуклидами и в первую очередь цезием-137 и стронцием-90. Основной формой воздействия в этот период на агроэкосистемы является загрязнение продукции сельскохозяйственного производства, вследствие чего возникает необходимость изменения структуры производства. Продолжительность этого периода может составлять десятки лет.

Таким образом, в результате радиационных аварий на атомных станциях и предприятиях ядерной промышленности внезапному и крупномасштабному загрязнению могут подвергаться экосистемы на значительных территориях. При этом пространственная структура загрязнения экосистем может иметь сложный характер и определяется целым комплексом факторов.

### **Международная шкала событий на АЭС**

Международная шкала оценки тяжести событий, связанных с нарушением ядерной или радиационной безопасности, разработана в 1988 г. В России принята в 1990 г. Шкала является средством, позволяющим быстро оценить возможные последствия инцидентов на АЭС с точки зрения ущерба по степени по степени риска для окружающей среды и населения в ближайшее время и в определенном будущем.

Шкала разработана международной группой экспертов с участием МАГАТЭ и Агентства по ядерной энергии Европейской организации по экономическому сотрудничеству и развитию.

Шкала разбита на 7 уровней (табл. 28 и 29)

Таблица 28

Международная шкала событий на ядерных объектах и АЭС

Аварии	7 Глобальная авария
	6 Тяжелая авария
	5 Авария с риском для окружающей среды
	4 Авария в пределах АЭС
Происшествия (инцидент)	3 Серьезное происшествие
	2 Происшествие средней тяжести
	1 Незначительное происшествие
Ниже шкалы – не важно для безопасности	

Три нижних уровня относятся к происшествиям верхние уровни (4 – 7) относятся к категории аварий. Предполагается, что при переходе на высший уровень шкалы тяжесть радиационных последствий инцидента на АЭС увеличивается на порядок.

## Критерии оценки тяжести событий на атомных станциях по международной шкале

Класс событий	Уровень событий	Критерии
Аварии	7. Глобальная авария	Внешний выброс большой части радиоактивного материала. Острые и отдаленные последствия для здоровья людей, долговременный ущерб окружающей среде
	6. Тяжелая авария	Внешний значительный выброс радиоактивного материала. Полная реализация плана противоаварийных мероприятий с целью ограничений последствий для здоровья людей
	5. Авария с риском для окружающей среды	Ограниченный внешний выброс радиоактивного материала. Значительное повреждение активной зоны. Частичная реализация плана противоаварийных мероприятий с целью снижения вероятности последствий для здоровья людей
	4. Авария в пределах АЭС	Внешний небольшой выброс радиоактивного материала. Частичное повреждение активной зоны. Облучение населения в установленных пределах доз. Облучение персонала с вероятностью возникновения острого лучевого поражения.
Инциденты	3. Серьезное происшествие	Внешний выброс, превышающий установленные пределы. Значительное загрязнение территории объекта. Переоблучение персонала, достаточных для возникновения острых последствий для здоровья. Облучение населения ниже установленного предела доз
	2. Происшествие средней тяжести	Инциденты с незначительным или потенциальным нарушением мер безопасности. Наличие значительного количества радиоактивности в зонах, не предназначенных проектом. Возможное облучение персонала превышающее установленный годовой предел доз.
	1. Незначительное происшествие	Отклонение от разрешенного режима эксплуатации, вызванное отказом оборудования, ошибкой человека или процедурными несоответствиями
	Ниже шкалы	Не влияет на безопасность

К седьмому уровню по данной шкале относится авария на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.), к шестому уровню авария на Южном Урале (ПО «Маяк», СССР, 1957 г.) и авария на реакторе в Ундскейле (Великобритания, 1957 г.), к пятому уровню относится авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.).

Инцидент на АЭС с частичным повреждением активной зоны при отсутствии внешнего выброса радиоактивности соответствует 4 уровню. Инцидент на АЭС без внешних и внутренних последствий, но с повреждением системы безопасности относится к 3 уровню.

Большинство событий на АЭС, о которых поступали сообщения, классифицируются ниже уровня 3.

## **Радиозэкологическая оценка ядерных аварий**

### **Авария в Три-Майн-Айленде (США)**

Авария произошла на атомной электростанции в США в г. Три-Майн-Айленд в марте 1979 года. Она явилась одной из самых крупных в истории ядерной энергетики США. Общий выброс радионуклидов в окружающую среду составил 518 ГБк по йоду-131. Основным критическим звеном в воздействии радиоактивного выброса на агроэкосистемы была «молочная» цепочка. В данном случае были приняты решительные меры по ликвидации последствий аварии. В частности в течении 10 дней была изменена структура ведения животноводства. Из районов подвергшихся воздействию аварийных выбросов были эвакуированы дети и беременные женщины, что повлекло за собой важные социальные последствия. Продукты сельскохозяйственного производства использовались только после соответствующей обработки. Благодаря принятым мерам, биологические эффекты ионизирующего излучения выявлены не были. Однако агропромышленному сектору штата Пенсильвания был нанесен значительный материальный ущерб в десятки миллионов долларов в первую очередь из-за временного изменения структуры агропромышленного производства и потребления продуктов.

### **Авария в Уиндскейле (Англия)**

Авария произошла на одном из двух реакторов завода по производству плутония в Великобритании 10 октября 1957 года. Из-за метеорологических условий радионуклиды рассеялись на большой территории юго-восточной части Англии. В период вечера 11 -15 октября радиоактивное загрязнение достигло территорий Бельгии, Франции, Голландии, Дании, Германии, Норвегии.

Активность попавших в окружающую среду радионуклидов составила: йод-131 -  $7,4 \cdot 10^{14}$  Бк, теллур-132 –  $4,4 \cdot 10^{14}$  Бк, цезий-137 –  $2,2 \cdot 10^{14}$  Бк, стронция-89 -  $3 \cdot 10^{12}$  Бк и стронция-90 –  $7,4 \cdot 10^{10}$  Бк.

На основании анализа проб воздуха, растительности, воды, молока, продуктов питания содержания радионуклидов в организме животных был сделан вывод о том, что основным фактором радиационной опасности является загрязнение молока йодом-131. В этой связи наиболее пристальное внимание уделялось содержанию радионуклидов в щитовидной железе КРС, овец и в молоке, что позволило установить картину переноса радионуклидов, в первую очередь йода-131, в экосистемах, окружающих радиохимическое производство. В таких ситуациях содержание радионуклидов в молоке отражает перенос радионуклидов в критической цепочке и может рассматриваться в качестве интегрального показателя, характеризующего уровень радиоактивного выброса на агроэкосистемы. Так

содержание йода-131 на большинстве ферм, окружающих Уиндскейл достигло тысяч беккерелей на литр. Максимальная концентрация йода-131 ( $5,8 \cdot 10^4$  Бк/л) наблюдалась на расстоянии 16 км в пробах, отобранных с фермы на 4-е сутки после радиоактивного выброса. В дальнейшем уровень йода-131 снижался. Анализ проб позволил оценить пространственную структуру загрязнения территории. На расстоянии 50 км. от реактора концентрация йода в молоке превышала  $4 \cdot 10^3$  Бк/л, на расстоянии до 80 км более  $2 \cdot 10^3$  Бк/л. Это говорит о достаточно больших распространения аварийного выброса. Серьезное воздействие на агроэкосистемы в районе Уиндскейла повлекло за собой принятие срочных мер по ограничению структуры использования сельскохозяйственной продукции. Был введен запрет на потребление молока с ферм на территории 500 км<sup>2</sup>. Всего было изъято 3 млн л молока. Данные ограничения имели к достаточно тяжелые социально-экономические последствия.

Содержание радиоактивного стронция в пищевых продуктах не превышало до аварийного уровня.

Высокими оказались дозы облучения щитовидной железы. Максимальные поглощенные дозы в результате внешнего облучения (гамма-излучения), которые могли получить люди на территории следа радиоактивного выброса, по расчетам, оценивались около 0,1 сГр на щитовидную железу взрослых и около 10 сГр на щитовидную железу у детей. При непосредственном измерении концентрации йода-131 в критическом органе, максимальная поглощенная доза на щитовидную железу ребенка оценена 16 сГр, взрослого – 4 сГр. Предельно допустимая доза облучения щитовидной железы для взрослых составляет 3 сГр, для детей 1,5 сГр.

При оценке последствий аварии, связанных с радиационным воздействием на животных было установлено, что максимальные уровни содержания радиойода в щитовидной железе у ограниченной группы овец составляли от  $1,5 \cdot 10^5$  до  $4,5 \cdot 10^5$  Бк на грамм сырой массы. Это привело к формированию дозовых нагрузок на этот орган до 1 тыс. сГр. Однако развития связанного с этим лучевой патологии отмечено не было, также не удалось зафиксировать и эффекты воздействия ионизирующего излучения на биологические сообщества.

### **Аварии на Южном Урале (СССР)**

Крупномасштабное радиационное загрязнение территории и облучение части населения, проживающего на Южный Урале в Челябинской, Свердловской и Курганской областях связано с деятельностью ПО «Маяк» (Челябинская область). Это предприятие

ядерно-топливного цикла военного назначения и информация о его деятельности была строго засекречена до 1989 г.

В 1949 году здесь был осуществлен пуск первого в стране промышленного комплекса по получению плутония и других делящихся материалов для изготовления ядерного оружия. Это стало точкой отсчета появления на территории области зон национального экологического бедствия.

Первая аварийная ситуация (1949 — 1956 гг.). Несовершенство, систем радиационного и технологического контроля привели в 1949 - 1956 годах к сбросу в реку Теча, являющуюся частью речной системы Исеть - Иртыш - Тобол - Обь, 76 млн. м<sup>3</sup> жидких радиоактивных отходов радиохимического производства суммарной активностью 2,75 млн.Ки, а также неконтролируемому выбросу радиоактивных аэрозолей в атмосферу. Радиационному загрязнению подверглись поймы реки Теча (протяженностью 240 км) и Исеть. Жители прибрежных сел испытали как внешнее, так и внутреннее облучение (при потреблении воды и продуктов питания). Наибольшее облучение получили жители побережья реки Теча (28,1 тыс. человек). Всего радиационному воздействию подверглись 124 тыс. человек, проживающих в прибрежной зоне рек Теча и Исеть Челябинской и Курганской областей. Особенно высокую дозу – 170 сЗв получили 1,2 тыс. жителей села Метлино, в последствии эвакуированных. Среди населенных пунктов, жители которых не эвакуировались, наибольший уровень облучения – 28 сЗв зафиксирован у жителей села Муслумово. По суммарной эффективной эквивалентной дозе село Муслумово до сих пор остается критическим. На жителей остальных населенных пунктов Челябинской и Курганской областей приходится эффективная эквивалентная доза 3,5 – 16 сЗв.

Всего в результате этой аварии было отселено 7,5 тыс. человек из 20 населенных пунктов, получивших средние эффективные дозы 3 – 170 сЗв

Вторая аварийная ситуация (1957 г.). 29 сентября 1957 года на ПО "Маяк" в результате технической неисправности взорвалась одна из емкостей-хранилищ высокоактивных отходов, образующихся в технологической цепочке создания ядерных боеприпасов. Эта авария известна как Кыштымская – по названию г. Кыштым, расположенного недалеко от ПО «Маяк». Она является одной из наиболее тяжелых в мировой практике. По своим биологическим, экологическим, социальным и экономическим последствиям она уступает лишь Чернобыльской трагедии и по Международной шкале событий классифицируется как тяжелая авария, последствия которой население, пострадавших районов испытывает по настоящее время. Взорвавшаяся емкость входила в состав прямоугольного, углубленного в почву на 8,2 м бетонного сооружения с ячейками-

каньонами для установки 20 стальных емкостей. Емкости охлаждались водой, протекавшей по кольцевому зазору между их стенками и стенкой каньона, и были оборудованы вентиляцией для разбавления радиоактивных газов до безопасной для взрыва концентрации. Хранилище было введено в эксплуатацию в 1953 г. К осени 1957 года в некоторых емкостях нарушилась герметичность, и они начали загрязнять окружающую среду. Расследование, проведенное после аварии специальной комиссией, показало, что наиболее вероятной причиной был взрыв сухих солей - нитрата и ацетата натрия, образовавшихся в результате выпаривания растворов в емкости, из-за их саморазогрева при нарушении условий охлаждения. Взрыв полностью разрушил емкость из нержавеющей стали, содержащую 70 - 80 т отходов, сорвал и отбросил в сторону на 25 м бетонную плиту перекрытия каньона. Из хранилища в окружающую среду была выброшена смесь радионуклидов общей активностью 20 млн Ки. Большая часть радионуклидов осела вокруг хранилища, а жидкая пульпа (взвесь), активность которой составляла 2 млн. Ки, образовала радиоактивное облако, состоящее из жидких и твердых аэрозолей. В основном общую активность выброса формировали следующие радионуклиды: церий-144 (66%), цирконий-95 + ниобий-95 (24,9%), стронций-90 + иттрий-90 (5,4%) и рутений-106 (табл. 30).

Таблица 30

Состав радиоактивных изотопов в выбросе Кыштымской аварии (1957)

Изотоп	Период полураспада	Вклад в общую активность смеси (%)
$^{89}\text{Sr}$	51 сутки	след
$^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	28,6 лет	5,4
$^{95}\text{Zr} + ^{95}\text{Nb}$	65 суток	24,9
$^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$	1 год	3,7
$^{137}\text{Cs}$	30 лет	0,036
$^{144}\text{Ce} + ^{144}\text{Pr}$	284 дня	66
$^{147}\text{Pm}$	2,6 года	след
$^{155}\text{Eu}$	5 лет	след
$^{239}\text{Pu}$	24600	след

Активность долгоживущего радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  составила 5,4 % от общей активности загрязнения или 4 ПБк (108000 Ки). Для сравнения: выброс  $^{90}\text{Sr}$  после Чернобыльской аварии был равен 8 ПБк (216000 Ки). В емкости находилось очень мало  $^{137}\text{Cs}$ , всего лишь 0,036 %. Скорее всего, это объясняется тем, что большое количество отходов было закачано в озеро Карачай с той целью, чтобы в емкостях оставалось больше места. Большая часть

других радиоактивных изотопов, находившихся в емкости, быстро осела на дно. Однако этого не произошло с  $^{137}\text{Cs}$ , который так и остался в жидкой форме.

Радиоактивное облако под действием ветра распространялось в северо-восточном направлении и прошло над территорией Челябинской, Свердловской и Тюменской областей. Образовавшийся след получил название Восточно-Уральского радиоактивного следа (рис.33) Территория его с плотностью загрязнения стронцием-90 более 0,1 Ки/км<sup>2</sup> составила 23 тыс. квадратных километров. В результате оказались загрязненными 217 населенных пунктов с общей численностью населения 272 тыс. человек. Наибольшему загрязнению подверглись Касменский, Кунашакский и Аргаяшский районы Челябинской области. В общей сложности пострадало 500 тысяч человек. К таким ужасающим последствиям, действие которых жители Челябинской области продолжают ощущать до сих пор, привел взрыв всего одной емкости с радиоактивными отходами.

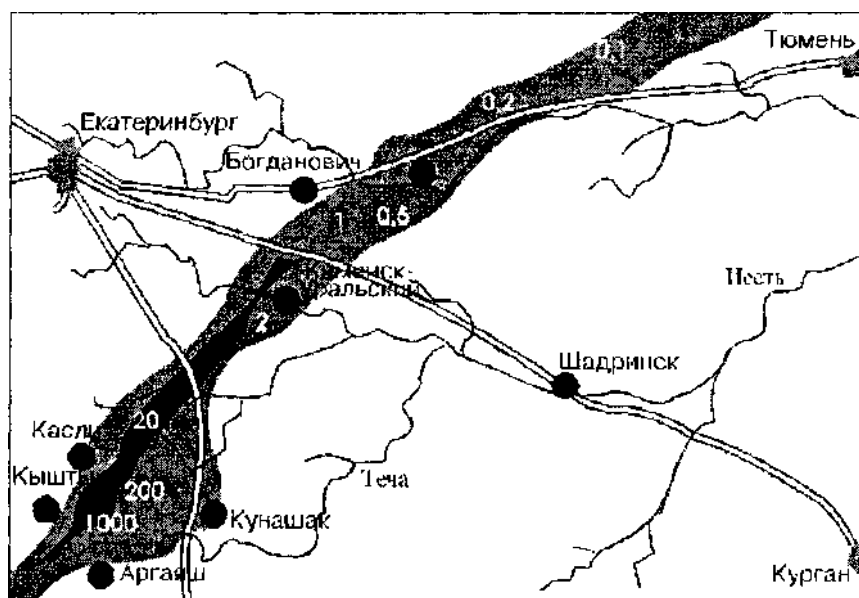


Рис. 33. - Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС)

В то время все больницы и клиники Челябинской области были заполнены людьми, которые впоследствии находились под наблюдением в течение нескольких лет после аварии. В последующие годы в результате переоблучения умерло около 200 человек. В 1958 году в Челябинской и Свердловской областях пришлось оставить необработанными 106000 гектаров плодородной земли. В 1961 году в Свердловской области в пользование была возвращена вся плодородная земля (47000 гектаров). В Челябинской области возобновили использование 40000 гектаров в 1978 году. 180 км<sup>2</sup> земли до сих пор запрещено использовать в сельскохозяйственных целях.



Причины аварии. На радиохимическом заводе НПО "Маяк" жидкие отходы после выделения оружейного плутония сливали в емкости-хранилища объемом около 300 м<sup>3</sup>, изготовленные из нержавеющей стали и помещенные в слегка заглубленные бетонные каньоны. Хранилища располагались на расстоянии около 2 км от завода. Для предотвращения возникновения ситуаций, при которых в отходах мог бы произойти химический взрыв, емкости охлаждали с помощью теплообменников, помещенных на внутренней стенке хранилища. Конструкция теплообменников не допускала их ремонта в случае повреждения. В 1956 г. теплообменник одного из хранилищ из-за неисправности был заглушен. Проведенные специалистами завода расчеты показали, что даже в отсутствие охлаждения отходы будут стабильными, однако эти расчеты оказались неверными. В результате более года не предпринималось попыток наладить теплосъем в этой емкости. Из отходов, находившихся в емкости с отключенным теплообменником, начала испаряться вода, и взрывоопасные нитраты и ацетаты сконцентрировались на поверхности раздела "отход - воздух". Случайная искра от неисправного контрольно-измерительного оборудования вызвала детонацию солей. Взрыв разрушил емкость и выбросил ее содержимое.

Радиационная обстановка после аварии. Смесь радиоактивных продуктов, рассеянная при взрыве, в основном содержала короткоживущие радионуклиды <sup>114</sup>Ce, <sup>144</sup>Pr, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb. Однако главную радиационную опасность на протяжении длительного времени после аварии представлял долгоживущий <sup>90</sup>Sr в равновесии с дочерним его продуктом <sup>90</sup>Y.

Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС) в основном сформировался через 11 ч после взрыва. Все это время ветер сохранял направление на северо-восток, а потому след оказался сильно вытянутым. Поскольку при его образовании атмосферные осадки не выпадали, а до того, как установился постоянный снежный покров, случались периоды сухой погоды с сильными ветрами, в течение первых полутора месяцев происходило перераспределение радиоактивных веществ на местности (ветровой перенос). Что привело к дополнительному загрязнению участков, прилегающих к головной части следа, где заражение было максимальным. Поэтому след здесь шире и размыт в восточном направлении.

В качестве "реперного" радионуклида, по содержанию которого оценивали радиоактивное загрязнение, был принят <sup>90</sup>Sr: с одной стороны, его период полураспада достаточно велик, с другой - он содержался в смеси в заметном количестве и играл

наиболее важную роль в формировании доз долговременного облучения живых организмов.

В границах плотности загрязнения этим нуклидом 0,1 Ки/км<sup>2</sup> длина следа достигла 300 км, а ширина – 30 - 50 км, в границах 2 Ки/км<sup>2</sup> - соответственно 105 км и 8 - 9 км. Плотность загрязнения 2 Ки/км<sup>2</sup> была признана предельной для безопасного проживания населения и определила официальную границу ВУРСа.

Радиоактивное загрязнение было обнаружено во всех без исключения объектах окружающей среды. Так, уровень радиоактивности в первые недели после аварии вырос по сравнению с предаварийным в траве в  $10^2 - 2 \cdot 10^5$  раз, открытых водоемах - в  $1,5 - 3 \cdot 10^4$  раз, зерне пшеницы - в  $25 - 10^3$  раз, молоке коров - в  $10 - 2 \cdot 10^3$  раз.

В последующем радиационная обстановка на территории ВУРСа значительно изменилась к лучшему. Опасность облучения человека и природных объектов снизилась в основном под действием четырех факторов:

- радиоактивного распада короткоживущих радионуклидов;
- перераспределения радиоактивных веществ, в том числе за счет заглубления в почве и донных отложениях;
- изменения механизмов поступления радионуклидов в растительность (прекратилось непосредственное поверхностное загрязнение растений, снизилось загрязнение, обусловленное ветровым переносом);
- хозяйственной деятельности, в частности, мероприятий по радиационной защите населения.

Так как авария произошла в конце сентября, в период, когда сельскохозяйственные растения были убраны, а выпас скота был почти закончен последствия аварии на агропромышленное производство были меньшими, нежели в случае выброса в период активной вегетации растений, и определялись, в первую очередь загрязнением сельскохозяйственных угодий <sup>90</sup>Sr с последующим поступлением его в сельскохозяйственную продукцию. Однако содержание радионуклидов в пастбищной растительности, различных сельскохозяйственных культурах, пищевых продуктах, фураже, и питьевой воде были достаточно высоким. Так, на удалении 12,5 - 18 км от места аварии концентрация смеси радионуклидов в травянистой растительности через несколько суток после выброса достигала 9,3 – 9,7 Ки/л. Через 20 суток концентрация радионуклидов в сене составила  $6,2 \cdot 10^{-4} - 7,0 \cdot 10^{-4}$  Ки/кг, в молоке  $2,2 \cdot 10^{-6} - 2,6 \cdot 10^{-6}$  Ки/л, в воде  $1,44 \cdot 10^{-6} - 2,8 \cdot 10^{-6}$  Ки/л.

Общая площадь территории, на которой уровни  $^{90}\text{Sr}$  в почве были значительны, с точки зрения воздействия на агропромышленное производство, превышала 15 тыс. км. При этом площадь сельскохозяйственных угодий, на которых уровни выпадения этого радионуклида превышали  $2 \text{ Ки/км}^2$  составила 100 тыс. га. Вследствие чего они были выведены из сельскохозяйственного использования.

При прохождении радиоактивного облака и в последующие дни сельскохозяйственные животные, находящиеся на пастбищах подверглись загрязнению их внешнего покрова и интенсивному поступлению радионуклидов с травой в организм. В ближайших к месту выброса населенных пунктах концентрация бета-излучающих радионуклидов в различных органах и тканях сельскохозяйственных животных достигала  $3 \cdot 10^{-5} \text{ Ки/кг}$ . При такой концентрации радионуклидов через 9 – 12 суток после выброса начиналась гибель животных с признаками острой лучевой болезни.

Сразу после аварии были начаты работы по организации радиационного контроля продукции на территориях, где уровни загрязнения превышали  $0,5 \text{ Ки/км}^2$  по  $^{90}\text{Sr}$ . В этот же период были начаты работы, связанных с ликвидацией и снижением последствий аварии на агропромышленное производство. К ним относились:

- перепашка сельскохозяйственных угодий;
- изменение направленности ведения агропромышленного производства;
- использование методов и технологий, ограничивающих перенос радионуклидов по пищевым цепочкам.

Это позволило снизить содержание  $^{90}\text{Sr}$  в продукции животноводства общественного сектора 2 – 7 раз. Однако в продукции, получаемой в личных хозяйствах, содержание  $^{90}\text{Sr}$  было в 10 – 100 раз выше фоновых концентраций. Вследствие этого предел годового поступления  $^{90}\text{Sr}$  для части населения на протяжении ряда лет существенно превышался.

Из-за практически полного отсутствия в выпавшей смеси долгоживущих гамма-излучателей характер главного радиационного фактора определялся внутренним облучением (спустя год после аварии) за счет  $^{90}\text{Sr}$ , находящихся в местных продуктах питания и в воде.

Основными продуктами, с которыми стронций-90 поступал в организм человека, были хлеб и молоко. Через 8 лет после аварии с молоком попадало в организм человека 50% всего стронция-90, поступающего с пищей, на долю овощей приходилось 15 %, картофеля – 12 %, яиц – 8 %, мяса – 7 %, хлеба – 4 %. Через 30 лет после аварии суточное поступление стронция-90 в организм человека снизилось в 1300 раз по сравнению с начальным периодом. Это произошло благодаря уменьшению содержания стронция-90 в

молоке и других сельскохозяйственных продуктах вследствие физико-химических процессов трансформации этого радионуклида в почве и других природных процессов. Предел годового поступления стронция-90 для ограниченной группы населения  $3,2 \cdot 10^{-7}$  Ки/год превышался первые 4 года после аварии для людей, проживающих на территории с плотностью загрязнения стронцием-90 1 Ки/км<sup>2</sup>.

Авария 1957 г. стала мощным импульсом к исследованиям влияния радиоактивного загрязнения на дикие растения и животных - до этого радиобиологи располагали информацией лишь о медицинских, а не общебиологических или экологических аспектах действия ионизирующих излучений. С момента образования ВУРСа на его территории были начаты наблюдения за изменениями состояния и поведения организмов и сообществ. Однако, чтобы проверить и уточнить установленные при этом закономерности, приходилось проводить натурные, в том числе крупномасштабные, эксперименты с дополнительным облучением. Эти работы показали, что, как и следовало ожидать, при облучении природных экосистем обнаруживаются не только первичные радиационные эффекты, но и вторичные - опосредованные процессы, начало которым дают первичные изменения. Взаимосвязь между ними во многом определяет устойчивость экосистем к облучению.

Дозы, полученные растениями и животными на территории ВУРСа, в основном определялись тремя особенностями ситуации.

Во-первых, преобладающая доля энергии излучения приходилась на бета-частицы, а энергия таких частиц поглощается слоем биологической ткани толщиной несколько сантиметров. Поэтому распределение доз по различным компонентам биогеоценозов было близко к распределению радионуклидов в них.

Во-вторых, основной вклад в активность выпавшей смеси вносили радионуклиды с периодом полураспада менее года, и лишь через 1-1,5 года после аварии главной стала роль долгоживущих радионуклидов. В результате накопление доз протекало в два этапа - в период начального, или "острого", облучения и в период отдаленного, или хронического, облучения, причем большая часть поглощенной дозы сформировалась в начальный период.

Наконец, радиоактивный выброс и значительная часть "острого" периода облучения пришлись на фазу физиологического покоя растений и многих видов животных, при которой восстановительные процессы в организмах заторможены. Поэтому степень радиационных повреждений определялась не столько мощностью дозы и динамикой режима облучения, сколько интегральной дозой, накопленной в органах и тканях. Таким образом, основные радиобиологические эффекты были вызваны дозой, накопленной в

течение осени и зимы 1957/58 г. Они появились весной 1958 г. при возобновлении метаболической активности организмов и обнаруживались несколько последующих лет. В дальнейшем, при хроническом облучении с высокой мощностью дозы, наблюдались только генетические эффекты. В "острый" период максимальному облучению подверглись сосны, хвоя которых долго удерживала выпавшие радионуклиды, семена трав, а также почки возобновления и генеративные отпрыски растений, находившиеся на поверхности почвы или близко к ней. Спящие почки и семена трав получили за это время дозу до 40, хвоя сосны - до 20, меристема почек сосны - до 10, меристема почек березы - до 5, семена деревьев в корнях - до 4 рад.

Среди млекопитающих и птиц наибольшие дозы накопили те виды, для которых было существенно не столько внешнее облучение, сколько облучение желудочно-кишечного тракта при потреблении загрязненной пищи. Исключением стали мышевидные грызуны. Поскольку размеры их тела сравнимы с длиной пробега бета-частиц, к тому же эти животные преимущественно обитают в почве и на ее поверхности и в поисках корма далеко не перемещаются, они получили максимальную дозу на все тело. В порядке возрастания полученных доз животные и птицы образуют следующий ряд: перелетные птицы, хищные млекопитающие, хищные зимующие птицы, зерноядные зимующие птицы, крупные травоядные, мышевидные грызуны. Существенному облучению подверглись почвенные беспозвоночные - от 1 до 80 крэд. Дозы облучения организмов в водных экосистемах не превышали 2 рад. В двух самых загрязненных водоемах следа дозы внешнего облучения рыб достигали 4 крэд.

Известно, что наиболее чувствительны к радиации хвойные деревья. Одно из первых практических доказательств этого было получено на территории ВУРСа. Именно у сосны весной 1958 г. появились первые лучевые эффекты - сначала кончики хвои пожелтели, а затем полностью или частично усохли. Кроме того, многие верхушечные и боковые почки облученных сосен не тронулись в рост, а из уцелевших образовались короткие и толстые пучки побегов с удлиненной хвоей. На участке с плотностью загрязнения более 180 Ки/км<sup>2</sup>, что соответствует накоплению за первый год в хвое дозы свыше 3 - 4 крэд, сосны к осени 1959 г. полностью погибли. Общая площадь таких участков составила около 20 км<sup>2</sup>. Гибель сосны под действием радиации наблюдалась и при аварии Чернобыльской АЭС. На других участках, где поглощенные дозы в кронах деревьев превышали 0,5 крэд, радиационное повреждение сосны выражалось в пожелтении, усыхании и опадании части хвои, дефектах развития новой хвои, снижении прироста побегов и ствола, разнообразных физиологических и морфологических нарушениях, снижении жизнеспособности семян и

пыльцы, фенологических сдвигах. Эти нарушения отмечались в течение двух лет после образования следа.

Березовые леса оказались значительно более устойчивыми к радиоактивному загрязнению. Они полностью погибли только на участках с максимальной плотностью загрязнения - 4000 Ки/км<sup>2</sup>, где меристема почек за "острый" период получила дозу свыше 20 крад. При более низких дозах у берез усыхал верхний ярус кроны, листья оказывались недоразвиты, в течение 4 лет после аварии отмечались фенологические сдвиги. Площадь территории, где наблюдались радиационные повреждения березы, составила 17 км<sup>2</sup>. Различия устойчивости сосновых и березовых лесов к радиационному загрязнению объясняются двумя причинами. Во-первых, сама по себе радиочувствительность сосны выше. Во-вторых, поглощенная доза была значительно больше в кронах сосен, чем берез, из-за длительности пребывания радионуклидов на хвое. Вот почему гибель деревьев березы могла происходить при плотности радиационного загрязнения примерно в 70 раз более высокой, чем гибель сосны, а гибель аналогичных критических органов дерева - в 5 раз более высокой.

Среди трав, как уже говорилось, наиболее пострадали многолетние растения, почки возобновления которых расположены невысоко над поверхностью почвы. На участках с плотностью загрязнения свыше 1500 Ки/км<sup>2</sup> эти виды исчезли; их место заняли растения с почками возобновления, погруженными в почву. Этот процесс длился 3-4 года, а затем начался медленный обратный процесс.

Самая многочисленная группа животных на территории следа - беспозвоночные. Сокращение численности и гибель под действием радиации замечена только у видов с долгой продолжительностью жизненного цикла и длительной фазой развития, протекающей в лесной подстилке, дернине или поверхностном слое почвы. Наиболее сильно эти эффекты проявились у дождевых червей, многоножек и панцирных клещей при плотности и загрязнения свыше 100 Ки/км<sup>2</sup>. Гораздо слабее выражены радиационные изменения у летающих насекомых, способных быстро расселяться на большие территории, или у беспозвоночных, имеющих укрытие. В частности, не замечено угнетающего действия радиации на муравьев, хотя они основную часть жизни проводят на поверхности лесной подстилки. Птицы и млекопитающие осенью и зимой 1957/58 г. могли получить летальные дозы только при постоянном обитании на участках с плотностью загрязнения свыше 1000 Ки/км<sup>2</sup>.

Поскольку подавляющая часть птиц, обитающих на территории следа, относится к перелетным, а авария произошла осенью, можно полагать, что воздействие радиоактивного

загрязнения на них началось лишь с весны 1958 г., когда мощность дозы в корнях деревьев снизилась в 10 раз. По расчетам, поглощенная доза в теле птиц за лето 1958 и 1959 гг. не превысила 100 - 200 рад, которая значительно ниже летальных значений. Гибели птиц, как в эти, так и в последующие годы не зарегистрировано, а их численность не зависела от плотности загрязнения. Единственный факт, который может быть объяснен влиянием облучения, - уменьшение числа птичьих гнезд в 1958 г. в лесах с уровнем загрязнения более 2000 Ки/км<sup>2</sup>.

Среди млекопитающих, обитающих на загрязненной территории, наибольшее разнообразие радиационных эффектов наблюдалось у мышевидных грызунов. В популяциях других млекопитающих (лось, косуля, волк, рысь, заяц) подобных радиационных эффектов не замечено.

Наиболее уязвимым звеном водных экосистем оказались растительноядные рыбы (каarp, карась) - зимой они залегают в ил, а это приводит к дополнительному облучению тела. На остальные, менее уязвимые звенья водных экосистем вредного влияния облучения не обнаружено.

Ликвидация последствий радиационной аварии на Южном Урале потребовала не только концентрации усилий специалистов самого разного профиля, но и четкой организации всех мероприятий, проводимых на территории ВУРСа с первых же дней катастрофы. Отметим, прежде всего, что, в отличие от аварии на ЧАЭС, правительственная комиссия по ликвидации последствий аварии 1957 г. не создавалась. Основные обязанности по организации работ и вся их тяжесть легли на два союзных министерства, местные партийные и советские организации, оборонное предприятие, где произошла авария, а также на отдельные медицинские, научные и сельскохозяйственные организации. Оценку сложившейся радиационной обстановки и прогноз уровней облучения населения в первые несколько недель после аварии осуществляли дозиметрические службы предприятия и местного медико-санитарного отдела с привлечением сотрудников экспедиции Института прикладной геофизики Главного управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР, выполнявшей в то время на предприятии другие научно-исследовательские работы. Для этого в центральной заводской лаборатории оперативно были изготовлены необходимые дозиметрические и радиометрические приборы, созданы специальные мобильные лаборатории, привлечена авиация. Экстренная и дополнительная плановая эвакуация проводилась оборонным предприятием под контролем Челябинского облисполкома; устройством и жизнеобеспечением эвакуированных занимались предприятие Минсредмаш СССР и Челябинский облисполком. С этой целью было

образовано несколько комиссий по оценке материального ущерба, денежной компенсации и организации переселения каждой семьи, включая создание нового жилого фонда. На проведение всех этих работ было затрачено свыше 200 млн. рублей в современном масштабе цен. Эта сумма была выделена правительством, а статьи расхода определялись самим предприятием и Челябинским облисполкомом.

Дальнейший ход работ по ликвидации последствий аварии требовал выработки научно обоснованных рекомендаций по хозяйственному обращению с загрязненной территорией, методичного контроля за здоровьем эвакуированного и проживающего близко к ВУРСу населения. Для этого при оборонном предприятии в 1958 г. была создана Опытная научно-исследовательская станция, в задачи которой входило решение общих и прикладных задач радиоэкологии, прежде всего сельскохозяйственных, организованы Филиал Института радиационной гигиены Минздрава РСФСР и Комплексная сельскохозяйственная лаборатория Минсельхоза СССР, преобразованные затем в Филиал № 4 Института биофизики Минздрава СССР. К работам был также привлечен Институт биофизики Минздрава СССР, организованы радиологические отделы и подчиненные им радиологические лаборатории Челябинской и Свердловской областных санитарно-эпидемиологических станций, областные ветеринарно-радиологические лаборатории. К обширным научным исследованиям подключились отдельные академические и ведомственные научные организации.

Более чем тридцатилетний опыт работ на Южном Урале стал основой для разработки концепций долговременного обращения с территориями, подвергшимися радиационному загрязнению. Эти концепции достаточно универсальны и, помимо обобщения опыта обращения с территорией ВУРСа, включают принципы решения сложных задач организации радиационной защиты населения и сельскохозяйственного использования территории, пострадавшей от аварии на Чернобыльской АЭС. По своей сути концепции направлены на определение возможностей как длительного проживания населения на загрязненной территории, так и хозяйственного использования этой территории, вне зависимости оттого, проживает ли на ней население. В основу подхода к решению этих задач положено разбиение территории на зоны по плотности радиоактивного загрязнения, а определение возможностей долговременного проживания населения в отдельных зонах и хозяйственного использования загрязненной территории. Возможность долговременного, на протяжении жизни одного поколения после аварии (70 лет), проживания населения на загрязненной территории определяется условием, чтобы потенциальная доза облучения населения за этот период не превышала предельной, специально устанавливаемой дозы



облучения за этот же самый период. До недавнего времени в отечественной и зарубежной практике радиационной защиты не было опыта установления предела дозы облучения населения за такой длительный период. Первая серьезная попытка в этом направлении была предпринята Национальной комиссией по радиационной защите и Министерством здравоохранения СССР в применении к населению, облучаемому в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В качестве предела эквивалентной дозы суммы внешнего и внутреннего облучения населения принято значение, равное 35 бэр за жизнь. Следует отметить, что это значение вызывает широкую дискуссию в научных кругах.

Когда предел дозы за жизнь установлен, можно оценить максимально допустимую плотность загрязнения территории одним или несколькими долгоживущими радионуклидами, при которой возможно длительное проживание населения. С этой целью следует оценить динамику и интегральную за 70 лет дозу по всем путям внешнего и внутреннего облучения населения в расчете на единичную плотность загрязнения, применяя основные количественные показатели формирования внешнего и внутреннего облучения, определяемые с учетом радиоэкологических особенностей. В этой связи существенное значение приобретает прогноз снижения из-за заглубления радиоактивного вещества в почву и предпринимаемых мер дезактивации, а также прогноз снижения мощности дозы внутреннего облучения в результате мер радиационной защиты и природных радиоэкологических факторов. Сопоставляя обоснованные для предельной дозы 35 бэр плотности загрязнения, можно принимать решения о возможности долговременного проживания населения на загрязненной территории.

Третья аварийная ситуация (1967г.) Весной 1967г. в результате пылевого переноса радионуклидов с обсохшей береговой полосы озера Карачай (открытого хранилища жидких радиоактивных отходов) на промышленной площадке ПО "Маяк" вновь возникла аварийная ситуация. Радиоактивные вещества активностью 600 Ки, состоящие преимущественно из частиц иловых, отложений, рассеялись на расстоянии 50 — 75 км, усилив загрязнение территории от аварии 1957г. В выпавшей смеси содержались в основном цезий-137 и стронций-90. Радиоактивный след охватил территорию 2700 км<sup>2</sup>, в т.ч. 63 населенных пункта с численность жителей 41,5 тыс. человек. Радиационную обстановку на территории радиоактивного следа формировало как внешнее облучение от почвы за счет выпавших радионуклидов, так и внутреннее - в результате проникновения радионуклидов в организм по пищевым цепочкам с местными продуктами питания, в основном с молоком.

Кроме того, использование озера Карачай в качестве хранилища среднеактивных отходов привело к накоплению в нем, к настоящему времени, 120 млн. Ки активности и к формированию над озером, в результате инфильтрации радионуклидов из донных отложений, линзы загрязненных подземных вод объемом около 5 млн.м<sup>3</sup> и площадью 10 км<sup>2</sup>, скорость пространственного перемещения которых достигает 80 метров в год. Существует реальная возможность разгрузки этих вод в открытую гидрографическую сеть, угрожающая радиационным загрязнением и питьевым водозаборами населенных пунктов.

В результате этих инцидентов на Урале была загрязнена значительная часть территории площадью 25 тыс.км<sup>2</sup>, повышенному радиационному воздействию подверглись до 450 тыс. человек, более 18 тыс. из них были переселены на новые места жительства, было диагностировано 935 случаев хронической лучевой болезни. За все время деятельности ПО "Маяк" было образовано более 500 тыс. тонн твердых радиоактивных отходов, около 400 млн. м<sup>3</sup> жидких радиоактивных отходов суммарной активностью более 1 млрд. Ки, условия и формы хранения которых не отвечают современным требованиям безопасности. Продолжается насыщение радионуклидами подземных вод, окружающих открытые водоемы-хранилища среднеактивных отходов. Неотвратимо растет опасность залповой разгрузки (в случае прорыва конечной плотины водоемов-хранилищ низкоактивных отходов) в открытую гидрографическую сеть с выходом в Северный Ледовитый океан радиоактивной воды. Уровень воды в конечном водоеме уже близок к критической отметке. Накоплено более 30 тонн опаснейшего высокофонового плутония, окончательного решения по утилизации или долговременному хранению которого еще не принято. Кроме того, в результате заключенных межправительственных соглашений о сокращении ядерного оружия встает проблема хранения и утилизации освобождаемых делящихся материалов.

Наиболее оптимальным в настоящее время решением проблем стабилизации уровня радиации в водоемах, обеспечения энергоемких реабилитационных мероприятий электроэнергией, утилизации запасов плутония, как энергетического высокофонового, так и конверсионного оружейного топлива, различными экспертными комиссиями и специалистами признано сооружение Южно-Уральской атомной электростанции с реакторами на быстрых нейтронах. Предполагается сооружение на площадке ПО "Маяк" комплекса по изготовлению смешанного уран-плутониевого топлива для АЭС с реакторными установками на быстрых и тепловых нейтронах.

Таким образом, крупномасштабное радиационное загрязнение территории и облучение части населения, проживающего на Южном Урале в Челябинской, Свердловской

и Курганской областях, связано с деятельностью ПО "Маяк". Радиационную обстановку в указанных областях определяют последствия трех аварийных ситуаций, связанных со значительным накоплением радиоактивных отходов, несовершенством технологии обращения с радиоактивными отходами и их хранения. Эффективность проведенных мероприятий была явно недостаточна, поскольку территория радиоактивного загрязнения и до настоящего времени остается источником облучения населения на уровне предела допустимых доз, а в отдельных случаях превышая его. Данное обстоятельство требует улучшения радиологической обстановки в регионе, так как по данным на 1 января 1995 г. общая активность переработанных радиоактивных отходов составила более 51 млн Ки, что сопоставимо с масштабами чернобыльских выбросов.

### **Авария на Чернобыльской АЭС**

В ночь с 25 на 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), расположенной в 160 км к северо-востоку от Киева и в 15 км к северо-западу от Чернобыля (Киевская обл.), произошла крупнейшая в мировой истории авария, повлекшая за собой тяжелые последствия для людей и окружающей природы. Авария произошла на четвертом блоке ЧАЭС в 01 ч 23 мин (по московскому времени) при проведении проектных испытаний одной из систем обеспечения безопасности, входящей в состав энергоблока реактора типа РБМК-1000. Суть испытаний - использование механической энергии останавливающихся турбогенераторов (т. н. выбега) для выработки электроэнергии в условиях наложения двух типов аварийных ситуаций: а) полной потери электроснабжения АЭС; б) максимальной проектной аварии, при которой происходит разрыв трубопровода большого диаметра циркуляционного контура реактора.

Испытания проводились в режиме пониженной мощности, с повышенным расходом теплоносителя через реактор, незначительным недогревом теплоносителя до температуры кипения на входе в активную зону и минимальным паросодержанием. Испытания выявили серьезные просчеты в конструкции реактора: 1) наличие высокого положительного парового коэффициента реактивности; 2) появление положительного быстрого мощностного эффекта реактивности при любых режимах эксплуатации; 3) неудовлетворительная конструкция стержней системы управления и защиты реактора. Кроме того, были допущены недочеты в организации испытаний, обусловленные как проблемами и упущениями нормативно-технической документации, так и недостаточной квалификацией персонала ЧАЭС.

В результате перечисленных причин реактор к моменту полного вывода на режим испытаний в 01 ч 22 мин с 26 апреля 1986 г. находился в неустойчивом трудноуправляемом

состоянии. Включение аварийной защиты (вместо запланированного времени) привело к обратному эффекту повышения давления и подъема уровня барабанах - сепараторах, повышения давления технологических каналов в реакторном пространстве. В 01 ч 23 мин произошли два мощных взрыва с разрушением части реакторного блока и машинного зала, повлекших за собой пожар и выброс в атмосферу радиоактивных веществ.

Объем и динамика радиоактивного выброса определялись количеством и изотопным составом топлива, загруженного в реактор к началу испытаний, а также метеорологической обстановкой в период с 26 апреля по 10 мая 1986 г., когда разрушенный реактор был окончательно заглушен.

По официальным оценкам, суммарная активность выброса составила 50 МКи (без инертных газов), что составило около 4 % общей активности топлива в реакторе. Это в тысячу раз больше, чем при аварии на АЭС в Три-Майл-Айленде (США). Состав выброса в целом соответствовал изотопной структуре топлива в реакторе в котором преобладали короткоживущие радионуклиды, в первую очередь йод-131. Из долгоживущих радионуклидов в составе выброса преобладал цезий-137. Стронция-90 было значительно меньше в отличие, от Кыштымской аварии. Еще меньше было плутония-239, представляющего наибольшую опасность в долгосрочном плане и входящего в состав горячих частиц (компоненты разрушенных твэлов), отличающихся чрезвычайно высокой удельной активностью. В выбросе имелись и не входящие в состав топлива вещества - элементы конструкции реактора и материалы, сброшенные на реактор при тушении пожара (песок и глина, доломит, свинец, соединения бора).

Большая высота радиоактивного выброса (до 2 км) и изменчивость метеорологической обстановки в период 26 апреля - 10 мая 1986 г. (прежде всего изменение направления ветра на 360°) определили особенности последующего выпадения радиоактивных материалов на почву и воду, а также характер загрязнения территории (прежде всего его огромную площадь). Радиоактивные выпадения были зарегистрированы на удалении более 2 тыс. км от места аварии, затронув территорию по крайней мере 20 государств. Только на территории Белоруссии, Украины и России, пострадавших более всего, загрязнению цезием-137 с плотностью выпадений свыше 1 Ки/км<sup>2</sup> подверглась в совокупности территория 131 тыс. км<sup>2</sup> с населением около 4 млн. человек, в т. ч. около 1 млн. детей (табл. 31).

Наибольшее количество радионуклидов выпало в Белоруссии. Загрязнено оказалось более 13 тыс. км<sup>2</sup> (в т. ч. более 9 тыс. км<sup>2</sup> сельскохозяйственных угодий). Это свыше 6 %

территории страны, на которой проживало 2,1 млн. человек, или каждый пятый житель республики.

Таблица 31

Радиоактивное загрязнение территории стран СНГ в результате чернобыльской катастрофы

Страна	Площадь, км <sup>2</sup>				Итого
	Площадь загрязнения <sup>137</sup> Cs, Ки/км <sup>2</sup>				
	1 - 5	5 - 10	15 - 40	Более 40	
Россия	39280	5450	2130	310	47170
Украина	34000	1990	820	640	37450
Белоруссия	29920	10170	4210	2150	46450
Итого	103200	17610	7160	3100	131070

В реке Припять и на отдельных участках течения Днепра было выявлено загрязнение свинцом, использовавшимся для аварийного тушения четвертого блока ЧАЭС с вертолетов. Радиоактивному загрязнению подверглась также значительная территория европейской части России.

Особенно тяжелое последствие чернобыльской катастрофы - значительное ухудшение состояния здоровья большого количества людей. В момент аварии на блоке находилось 444 человека, в т. ч. 176 работников ЧАЭС и 268 строителей. Кроме того, непосредственно в зоне высокого излучения, достигавшего вблизи реактора 500 Р/ч, находились пожарные, прибывшие по аварийному вызову (21 человек). По состоянию на конец лета 1986 г., погиб 31 человек, в т. ч. шестеро пожарных. Более 200 человек были госпитализированы с диагнозом лучевая болезнь.

Официальные данные об общем количестве умерших в результате чернобыльской катастрофы за 1986—1995 гг. отсутствуют. По некоторым оценкам, эта цифра составляет от трех до десяти тысяч человек. В Распределенный регистр пострадавших от катастрофы на ЧАЭС в странах СНГ включено около 600 тыс. человек, принимавших участие в ликвидации аварии.

По оценке экспертов Научного комитета ООН по действию атомной радиации, полная коллективная эквивалентная доза для населения всех стран мира, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие чернобыльской катастрофы, составляет 600 тыс. чел.-Зв.

Основная угроза здоровью людей обусловлена воздействием доминирующих факторов – йода-131, цезия-137 и стресса. У 1,5 млн. человек, проживающих в зоне наибольшего загрязнения йодом-131, дозы облучения щитовидной железы составили у 87 % - до 30 сГр, у остальных от 30 до 100 сГр и выше (при дозовом пределе 17,3 сГр,

установленном на период с апреля 1986 г. по 1 января 1990 г.). Наиболее сильно пострадали ликвидаторы из числа военнослужащих и специалистов. В результате в загрязненных радионуклидами областях Белоруссии за 1986 - 1990 гг. в два раза увеличилась заболеваемость раком щитовидной железы, заболеваемость злокачественными новообразованиями возросла на 20 %.

Стрессовые факторы, связанные с аварийной ситуацией и эвакуацией, привели к росту сердечно-сосудистых заболеваний и, прежде всего ишемической болезни сердца. В целом показатели состояния здоровья республик бывшего СССР пострадавших от чернобыльской катастрофы, за последующие годы ухудшились заметнее, чем на остальной территории этих республик. По данным Министерства здравоохранения СССР, среди населения, пострадавших в результате чернобыльской катастрофы количество здоровых людей за 1986 - 1990 гг. снизилось на 20 %.

Прямой материальный ущерб от катастрофы оценивается специалистами в 10 млрд. руб., косвенный - до 250 млрд. руб. (в ценах 1987 г.).

Для предотвращения развития аварии на ЧАЭС были приняты экстренные меры: тушение огня, глушение разрушенного реактора, сооружение над ним защитного «саркофага» и действия по защите населения (информирование людей, эвакуация местного населения, обеспечение препаратов, содержащих стабильный йод и т. д.).

Благодаря усилиям пожарных, 6 из которых скончалось от переоблучения, удалось не допустить распространения огня на третий блок станции. Оперативно была проведена консервация разрушенного главного корпуса четвертого блока, над которым был сооружен «саркофаг».

Однако в отличие от экстренных мер, действия населения были произведены с опозданием и недостаточно широко. Неудовлетворительным было информирование жителей близлежащих регионов и в целом страны. Граждане СССР услышали об аварии на следующий день из сообщений иностранного радио, а из собственных средств массовой информации почти через неделю. О масштабах катастрофы они получили представление только три дня спустя, что отрицательно сказалось на остроте и глубине восприятия случившегося обществом, и эффективности мер по переселению и социальной защите пострадавших.

Эвакуация людей началась с задержкой более чем на 12 часов. В целом до конца 1986 г. из 188 населенных пунктов (включая г. Припять) было переселено 116 тыс. человек, в 1987 - 1990 гг. - более 135 тыс. человек, в 1991 - 1992 гг. около 100 тыс. человек.

Снабжение населения йодными препаратами также было проведено с большим опозданием – почти через неделю после аварии (период полураспада йода-131 составляет 8 суток). В некоторых случаях они и вовсе не раздавались.

Выпавшие радиоактивные веществ оказали соответствующее воздействие на флору и фауну загрязненной территории. Так, исследование динамики численности мышевидных грызунов на участках с различными уровнями ионизирующего излучения показало существенное снижение их численности в год аварии на наиболее загрязненных участках ближней зоны ЧАЭС, что можно объяснить гибелью животных под действием облучения. В дальнейшем численность грызунов восстановилась за счет мигрантов. Осенью 1986 года происходило размножение животных, но при этом наблюдалась высокая эмбриональная смертность. Выявлены морфологические изменения и нарушения в системе крови и печени у мышевидных грызунов, отмечены и генетические нарушения.

Ко всему этому авария на Чернобыльской АЭС по активности выброса и площади загрязнения является наиболее тяжелой в истории ядерной энергетики. Радиоактивному загрязнению подверглись природные и агротехнические системы не только СССР, но и многих стран Западной и Восточной Европы. Эта авария вскрыла существенные недостатки в развитии ядерной энергетики, заставила по-новому оценить проблемы надежности действующих и строящихся объектов ядерной энергетики, проблемы обучения и подготовки персонала, выбора мест сооружения АЭС.

К наиболее пострадавшим странам (1 категория) относятся: Белоруссия, Россия, Украина, Финляндия, Швеция, Польша, Румыния.

Сильно пострадали (категория 2) - Чехословакия, Венгрия, Австрия, Югославия, Италия, Турция.

Слабому загрязнению (категория 3) подверглись Норвегия, Дания, Франция, Бельгия, Англия. Во всех этих странах было обнаружено повышенное содержание радионуклидов в воздухе, а после выпадения дождей в почвах и растениях.

Был нанесен колоссальный вред здоровью людей и экономике. Согласно данным 2000 г., из 860 тысяч, принимавших участие в ликвидации погибло более 55 тысяч человек. Десятки тысяч стали инвалидами.

В 1986 –1989 гг. были проведены работы по дезактивации 994 населенных пунктов (в 50% из них по три – четыре раза) и 17,8 тыс. км<sup>2</sup> территории. Было вывезено 1,7 млн. м<sup>3</sup> загрязненного и ввезено 2,8 млн. м<sup>3</sup> чистого грунта. Однако эффективность дезактивации оказалась недостаточной.

Области Российской Федерации с уровнем загрязнения почвы выше 1 Ки/км<sup>2</sup> (% - доля загрязненной территории)

Область	%	Область	%	Область	%
Брянская	34	Курская	4,4	Пензенская	3
Калужская	17	Ленинградская	1	Рязанская	15
Белгородская	8	Липецкая	8	Смоленская	0,5
Воронежская	1,5	Орловская	40	Тамбовская	1,7
Тульская	47	Ульяновская	0,6		

Одно из важнейших следствий аварии на ЧАЭС – рост активности «зеленого» и антиядерного движения в СССР (позже в странах СНГ) и мире, заметное снижение темпов или прекращение строительства новых и консервация некоторых действующих АЭС в 1987—1989 гг. В последующие годы произошло смягчение ситуации, возобновилось планирование новых и продолжение строительства АЭС в разных странах, включая Россию.

Несмотря на то что крупномасштабные действия министерств и ведомств начались почти сразу после аварии 26 апреля 1986 г., Государственная союзно-республиканская программа по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС на 1990 - 1995 г. была принята лишь в апреле 1990 г. Общая сумма затрат, предусмотренная союзным госбюджетом на ее выполнение, была определена в 11 млрд. р. (в ценах 1990 г.). В 1991 г. были приняты Закон СССР «О социальной защите граждан, пострадавших вследствие чернобыльской катастрофы» и Закон РСФСР «О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС», который в последующем изменялся. Несколько ранее приняты аналогичные законы и программы в Белоруссии и на Украине. С распадом СССР и резким ухудшением экономической ситуации выполнение всех программ существенно замедлилось.

#### **Радиоактивные отходы на АЭС**

Радиоактивные отходы образуются на АЭС из двух источников: главным является основной технологический контур АЭС, другим источником являются вспомогательные установки, например, газовый контур, контур охлаждения. Источники радиоактивных отходов активационного происхождения, например, радиоактивные продукты коррозии или образующийся в процессах деления тритий (сверхтяжелый изотоп водорода), имеют активность, строго меняющуюся во времени по известному закону. Случайным источником являются продукты деления, попадающие в теплоноситель.



Атомная электростанция - такое же производство, как и другие, поэтому во время основного технологического процесса - отвода тепла от активной зоны реактора для выработки электроэнергии - образуются и радиоактивные отходы. Поскольку из теплоносителя постоянно нужно удалять разнообразные примеси, при очистке теплоносителя выделяются радиоактивные газы. Захватывая микрочастицы жидкости и твердые микрочастицы, газы переходят в аэрозольную форму. Следовательно, радиоактивные отходы также могут быть жидкими, твердыми и газообразными.

*Твердые радиоактивные отходы (ТРАО).* На АЭС это - детали демонтированных частей оборудования, отработанные аэрозольные и прочие фильтры, различные приспособления с наведенной радиоактивностью и др. - при неправильном обращении могли бы попасть за пределы АЭС и стать опасными для людей. Именно поэтому на АЭС так организуются учет и хранение (ТРАО), чтобы абсолютно исключить их бесконтрольное попадание в окружающую среду. Все ТРАО собирают в специальные контейнеры в местах их образования. Одновременно с загрузкой в контейнеры производится сортировка ТРАО по уровню активности.

Крупногабаритное оборудование разбирают и разрезают на части, часть твердых отходов сразу же перерабатывают - сжигают или прессуют (как, например, загрязненную спецодежду). Конечно, после сжигания дымовые газы ни в коем случае не выбрасывают сразу в вентиляционную трубу, вначале газы проходят систему грубых и тонких фильтров. В результате такой очистки от твердых частиц удаляемые газы практически уже не содержат радиоактивных веществ.

Далее ТРАО помещают в здание хранилища отходов. Емкость специальных ячеек для хранения ТРАО рассчитывается так, чтобы они были заполнены не ранее, чем через 10 лет после начала эксплуатации АЭС, и, кроме того, чтобы была возможность создания дополнительных ячеек. Отдельно хранятся твердые радиоактивные отходы высокой степени загрязненности, для них емкость ячеек рассчитана на хранение отходов в течение всего срока работы АЭС. Часть отходов может быть переправлена в региональные хранилища, и возможность извлечения ТРАО из ячеек в этом случае предусматривается.

Ячейки хранилищ выполнены из железобетона, дно ячеек находится выше уровня грунтовых вод, имеет гидроизоляцию снаружи строительных конструкций и поддон из нержавеющей стали. Кровля и перекрытие хранилищ отходов сделаны так, чтобы исключить попадание атмосферных осадков в ячейки для хранения ТРАО. Сами ячейки находятся под строгим дозиметрическим контролем, для чего по периметру хранилища

сделаны наблюдательные скважины, из которых регулярно отбираются пробы воды для анализа на содержание радиоактивных веществ.

Можно уверенно сказать, что в результате выполнения всех заложенных в проекте АЭС мероприятий контакт твердых радиоактивных отходов или излучения от них на человека абсолютно исключен. Вопрос охраны населения от ТРАО можно считать решенным.

*Газообразные радиоактивные отходы (ГРО).* Технологический процесс на атомной станции предусматривает постоянное удаление из теплоносителя присутствующих и образующихся в нем газов. ГРО образуются и при дегазации различных протечек теплоносителя, в бассейнах выдержки отработанного топлива, при дегазации растворов в баках выдержки.

Отводимые из контура и технологического оборудования газы состоят обычно из азота и водорода, содержат примеси водяного пара и газообразные продукты деления - радионуклиды Kr, Xe, Ar. Перед выбросом в атмосферу газы вначале подвергают выдержке, в течение которой их активность уменьшается за счет распада радиоактивных нуклидов. Для исключения образования взрывоопасных смесей с водородом газы разбавляют азотом и сжигают в специальных устройствах.

В ходе технологического процесса могут образовываться также радиоактивные отходы в форме аэрозолей - это микрокапли жидких радиоактивных сред и уносимые газовым потоком твердые микрочастицы. Аэрозоли могут также появляться в результате протечек теплоносителя. Радиоактивные аэрозоли и изотопы радиоактивного йода, которые также могут возникать при истечении теплоносителя, удаляются из помещений вентиляционными системами.

Перед выбросом в атмосферу воздух, содержащий газы и аэрозоли, проходит очистку на аэрозольных и йодных фильтрах, а также на угольных фильтрах-адсорберах.

*Жидкие радиоактивные отходы (ЖРО).* Сам технологический процесс на атомной станции таков, что всегда сопровождается образованием жидких радиоактивных отходов. Поскольку - сам теплоноситель представляет собой жидкость, системы охлаждения заполнены жидкостью, выполнение требований радиационной защиты (уборка помещений, стирка одежды, мытье в душевых и т.д.), также приводит к образованию ЖРО.

Для снижения активности (уменьшения количества нуклидов) реакторной воды и поддержания постоянного химического состава теплоносителя часть его все время отводится на фильтры внутриконтурной очистки в блок специальной водоочистки. В качестве фильтрующих материалов используются, например, ионообменные смолы.

Периодически их заменяют свежими, а отработанные смолы фильтров специальной водоочистки, как и прочие фильтрующие материалы и растворы, собирают в емкости промежуточного хранения. После выдержки в течение определенного времени, чтобы успели распасться короткоживущие радионуклиды, эти ЖРО переводят в твердую фазу - заливают битумом. Далее с ними поступают так, как и с твердыми радиоактивными отходами (это описано выше).

К следующей группе жидких отходов относится теплоноситель первого контура, часть которого сливают при проведении ремонтных работ в реакторном отделении или при перегрузке тепловыделяющих систем. Поскольку на внутренних поверхностях оборудования образуются радиоактивные продукты коррозии, их частично удаляют, используя для этого дезактивационные и промывочные растворы. К жидким радиоактивным отходам относятся и воды бассейнов перегрузки, и воды баков аварийного запаса борной кислоты. Жидкими радиоактивными отходами являются и так называемые трапные воды - случайные протечки теплоносителя и обмывочные воды и растворы, использованные для дезактивации наружных поверхностей оборудования, а также полов, стен и потолков помещений. Из прачечных, где стирают спецодежду, моют обувь, тоже поступают ЖРО. Вода из душевых может содержать радиоактивные вещества, но в таких малых количествах, что ее не относят к категории жидких радиоактивных отходов, хотя поступают с ней так же, как и с прочими ЖРО. Все эти воды очищаются от радиоактивных и прочих химических веществ на установках специальной водоочистки, а затем вновь используются в технологическом цикле АЭС. Так организуется оборотная система водоснабжения АЭС.

### **Захоронение радиоактивных отходов**

Проблема захоронения радиоактивных отходов не просто важна. Она становится критической. Поражают объемы накопленного радиоактивного мусора. По имеющимся оценкам, эксплуатация АЭС всего мира приведет к накоплению 200 тысяч тонн отработанного топлива уже в начале третьего тысячелетия.

Проблемы пытаются решить. Преобладает традиционный подход - захоронение в устойчивых геологических породах. На это затрачиваются огромные средства. Этот подход весьма уязвим. Во-первых, хранить надо долго. Распад радиоактивных элементов занимает сотни тысяч лет. Никакие технические конструкции не выдержат и сотой доли этих сроков. Металл и стекло стареют, бетон разрушается. Опасность усугубляется тем, что земная кора находится в движении. Например, в карьерах известняков Московского региона обнаружены трещины, разбивающие скальные массивы на прямоугольные блоки с

размерами до нескольких метров, в кристаллических породах существует полная свобода для обмена водными и газовыми потоками.

В огромных количествах радиоактивные отходы опускают на дно океана. Однако металлические контейнеры выдерживают в агрессивной морской среде не более 15 лет, а бетонные - примерно 25. Во фьордах Баренцева моря подобные контейнеры находятся уже в полуразрушенном состоянии и дают течь. Некоторые ядерные реакторы захоронены на дне Баренцева моря целиком. Предварительно они были залиты свинцом и пластмассой. Расчеты показали, что в таком состоянии реакторы пролежат безопасно не менее 500 лет. Но специалистам уже через 25 лет стало ясно, что радионуклиды начали попадать в воду. Да и 500 лет - время для человеческой истории недолгое, а для природы - мгновение.

Существующая практика захоронения радиоактивных отходов не выдерживает серьезной критики, хотя стоимость подобных проектов составляет десятки миллионов долларов. Все это делается с лучшими побуждениями. Хотя эти усилия тщетны и не приводят к желаемым результатам.

Задача состоит в том, чтобы от исторического варианта захоронения перейти к геологическому, когда длительность хранения радиоактивных отходов исчислялась бы не десятками и сотнями лет, а миллионами лет, соизмеримыми со сроками течения естественной радиоактивности. При этом область захоронения радиоактивных отходов должна быть полностью изолирована от внешней среды и находиться на нижнем уровне поверхности Земли.

Единственным местом, отвечающим этим условиям, является дно Мирового океана. А единственным способом захоронения радиоактивных отходов в его пределах - консервация контейнеров с радиоактивными отходами под мощным чехлом тонкодисперсных донных отложений. (Автором этой концепции является профессор Александр Васильевич Ильин, который считает, что подводные лавины гарантируют безопасное захоронение радиоактивных отходов на миллионы лет). Согласно его концепции, в Мировом океане есть огромные пространства, где накоплены мощные массы донных отложений толщиной до 10 - 15 км. Эти пространства располагаются по соседству с материками и представляют собой сравнительно пологие подводные склоны, плавно переходящие от мелководного шельфа к глубоководным равнинам дна океана. Именно подножие материкового склона - материковое подножие является привлекательным потенциальным местом захоронения радиоактивных отходов.

При определенных условиях - сейсмических толчках, землетрясениях, превышениях нагрузок на материковом склоне - возникают оползни и другие перемещения осадочного

материала. Значительная его часть сносится к подножию склона и там откладывается на вечные времена. Интенсивное поступление донных отложений со стороны материкового склона к его подножию получило название лавинной седиментации. По аналогии со снежными лавинами, срывающимися с горных склонов.

Особо отмечено, что эти грандиозные объемы донных отложений состоят из глинистых частиц, обладающих способностью к максимальной адсорбции и обеспечивающих наиболее плотную упаковку и консервацию любых объектов, оказавшихся в конечном пункте перемещения оползня.

Не трудно представить, насколько прочно и надежно были бы захоронены контейнеры с радиоактивными отходами, окажись они в зоне отложения оползней. Чтобы реализовать предложенную концепцию, следует лишь в нужное время и в нужном месте создать условия для возникновения оползня. Поскольку оползни чаще всего вызываются землетрясениями, надо просто пойти на поводу у природы и придумать нечто похожее. Возможно, следует проверить, как отреагирует осадочная толща на взрывы в глубоких скважинах материкового склона. Технические возможности позволяют использовать методы управления распределением энергии взрыва. Не исключены и другие способы возбуждения оползневых процессов.

Условия для развития оползня с целью захоронения радиоактивных отходов можно создать на материковых склонах многих районов Мирового океана. Однако определяющими критериями выбора таких районов должна быть достаточная мощность осадочной толщи и подходящая геометрия склонов.

Особенно много осадков - до 5 - 17 км - накопилось на материковых склонах Атлантического и Индийского океанов, в Арктике и Антарктике. Менее благоприятны в этом отношении склоны Тихого океана, располагающиеся в пределах "огненного кольца", где активные тектонические процессы не позволили сформировать на склонах мощного осадочного чехла.

Вместе с тем глубоководные желоба Тихого океана представляются заманчивыми структурами для захоронения радиоактивных отходов по той причине, что дно желобов расположено между двумя противостоящими склонами - естественными ограничителями перемещения оползня. В этом случае можно осуществить прямое попадание оползня в намеченный пункт. Использование глубоководных желобов Тихого океана в целях захоронения радиоактивных отходов потребует тщательных исследований и прогнозов. Впрочем, и в любых других случаях такие исследования необходимы.

## Вопросы и задания

1. Какие периоды выделяют в случае возникновения аварий на АЭС.
2. Международная шкала событий на АЭС
3. Критерии оценки тяжести событий на атомных станциях по международной шкале
4. Причины и последствия аварии в Три-Майн-Айленде (США)
5. Причины и последствия аварии в Уиндскейле (Англия)
6. Причины и последствия аварии на Южном Урале (СССР)
7. Причины и последствия аварии на Чернобыльской АЭС
8. Какие виды радиоактивных отходов образуются на АЭС
9. Проблемы захоронения радиоактивных отходов.

Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2.

## Список литературы

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
4. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
6. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
7. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
8. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
9. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.
10. *Ганев И.Х.* Физика и расчет реактора. Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992.
11. *Матвеев Л.В., Рудик А.П.* Почти все о ядерном реакторе. М.: Энергоатомиздат, 1990.

## Использованные информационные ресурсы

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=144649>

<http://energetika.in.ua/ru/>

<http://www.bibliofond.ru>

## Лекция 12.

### Принципы и методы радиэкологического нормирования

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы нормирования радиационного фактора, основные принципы обеспечения радиационной безопасности, требования к ограничению облучения населения.

**Ключевые слова.** НРБ 99/2009, допустимые дозы, пределы доз, категория А, категория Б, население, мЗв, принцип обоснования, принцип нормирования, принцип оптимизации, ПГП, ДОО, ЭРОА.

#### Методические рекомендации по изучению темы

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи и вопросы к лекции.

### Основные принципы обеспечения радиационной безопасности

Нормирование радиационного воздействия началось в 30-е гг. XX века. В это время для профессиональных работников была установлена дневная допустимая доза, которая соответствовала допустимому пределу дозы (ДПД), равному 0,6 Зв в год.

До середины 1970-х гг. ДПД рассматривался как некий пороговый уровень, ниже которого отсутствуют вредные для здоровья эффекты облучения, в т. ч. отдаленные.

В 1934 г. впервые Международной комиссией по защите от рентгеновского излучения и радия была рекомендована толерантная доза (200 мР/сут). В последующем, по мере выявления неблагоприятных последствий облучения, а также с накоплением знаний и опыта защиты, нормативы, к разработке которых подключилась и Национальная комиссия России, многократно пересматривались в сторону их снижения (табл.33).

Таблица 33

Допустимые дозы облучения персонала и населения.

год	Категория облучаемых лиц	Допустимая доза мЗв/год	Примечание
1946		600	Различий в допустимых дозах внешнего облучения персонала (участников испытаний ядерного оружия) и населения не делалось
1950		300	В случае аварии допускалось однократное облучение дозой 250 мЗв, но не более 1000 мЗв за год
1955		15	то же

1957	Категория А* Категория Б** Все население	150 15 Не выше природного фона	то же
1961	Категория А* Категория Б** Все население	50 5 0.5	то же
1969	НРБ-69 Категория А Категория Б Все население	50 5 1.7	Впервые введено понятие «предел» для категории Б и всего населения
1976	НРБ-76 Категория А Категория Б	50 5	
1987	НРБ-76/87 Категория А Категория Б	50 5	
1996	НРБ-96/99 Категория А Категория Б Население	20 5 1***	Указанные допустимые пределы доз введены с 1 января 2000 г.

\* Категория А — персонал.

\*\* Категория Б — ограниченная часть населения, не работающая непосредственно с источниками излучения, но которая по условиям размещения или проживания может подвергаться облучению.

\*\*\* Допустимая доза для населения 1 мЗв/год отвечает облучению людей в районах с нормальным уровнем естественного фона. В принятых ранее единицах она соответствует 0.1 бэр/год или мощности облучения 11 мкР/ч.

Какова опасность малых доз радиации? Как уже отмечалось, до сих пор нет однозначного ответа на этот вопрос. Критерием опасности облучения считают учащение случаев онкологических заболеваний и генетических нарушений по отношению к спонтанному уровню. Дополнительный рост числа таких недугов становится значимым в экономическом плане. Возможный риск возникновения заболеваний не должен превышать риск их возникновения в благополучных отраслях производства.

Как известно любая деятельность человека связана с определенным риском. Человек и общество идут на риск ради получения материальной выгоды. При регламентации допустимого облучения персонала и населения исходят из гипотезы беспороговой зависимости доза- эффект, считая, что при любой сколь угодно малой дозе, облучение может привести к возникновению злокачественных новообразований и генетических нарушений. Для оценки риска при малых дозах эффекты, наблюдаемые при средних и больших дозах, экстраполируют к величине 10 мЗв, принимая начальный участок дозовой зависимости линейным. Такой подход наиболее приемлем в обеспечении радиационной



безопасности. Однако остается не ясным, будет ли ответная реакция организма на облучение при малых дозах такой же, как и при больших.

Согласно последним оценкам, среди 1 млн человек облученных дозой 10 мЗв каждый, злокачественные новообразования могут быть спровоцированы у 480 человек, причем в 400 случаях — со смертельным исходом, в 80 — с серьезными генетическими нарушениями. Эти величины составляют лишь незначительную часть спонтанной заболеваемости: среди 1 млн человек от онкологических заболеваний умирает около 200 тыс., и это число увеличивается ежегодно примерно на 2%.

Установить реальную величину риска от облучения малыми дозами в эксперименте и эпидемиологических наблюдениях невероятно сложно. Для статистически значимого установления зависимости доза—эффект на уровне облучения 0.1 и 0.01 Зв наблюдаемые группы и аналогичные контрольные должны насчитывать соответственно 100 тыс. и 10 млн. человек. В экспериментах потребуется также огромное число подопытных животных. При этом необходимо исключить или учесть (что затруднительно) влияние других вредных факторов внешней среды, которое может быть более сильным, чем облучения в малых дозах. В условиях глобального загрязнения внешней среды различного рода физическими, химическими и биологическими агентами сделать это практически невозможно.

По современным данным, облучение человека может привести к детерминированным и стохастическим последствиям. Первые проявляются после гибели критического числа клеток, потерю которых организм не может компенсировать размножением оставшихся жизнеспособных клеток. Клинически детерминированные эффекты выражаются в функциональных нарушениях отдельных органов и организма в целом после облучения и проявляются, когда доза превышает некоторый порог. С ростом дозы тяжесть поражения быстро нарастает. Величина порога для разных тканей неодинакова. Раньше других страдают «критические» органы с иерархической структурой тканей и максимальной скоростью клеточного обновления. Наиболее радиочувствительны — красный костный мозг, хрусталик глаза и органы размножения. Пороговая доза для кратковременного угнетения кроветворения при остром облучении — 0.5 Зв, для помутнения хрусталика — 0.5—2 Зв, временная стерильность у мужчин возникает при дозе 2.5—6 Зв. Для плода доза 0.2 Зв чревата серьезной умственной отсталостью ребенка после рождения.

В производственных условиях персонал (а в аварийных условиях и население на радиоактивно-загрязненной местности) подвергается хроническому облучению, как правило, в малых дозах и с низкой мощностью. Биологическая эффективность такого облучения существенно ниже острого, что связано с включением компенсаторных

механизмов, которые в таких условиях могут в течение определенного времени обеспечивать нормальную жизнедеятельность организма. Для хронического облучения характерно медленное развитие нарушений. При длительном слабоинтенсивном облучении (1 мЗв в год) развитие хронической лучевой болезни становится возможным, когда накопление суммарной дозы достигает несколько зивертов и больше. В реакции организма можно выделить четыре фазы: отсутствие или слабая выраженность функциональных нарушений, напряжение или нарушение защитно-компенсаторных механизмов вплоть до структурных повреждений. О развитии хронической лучевой болезни свидетельствуют клинические проявления недостаточности компенсаторных механизмов. Длительность фаз и переход из одной в другую зависит от мощности и величины поглощенной дозы, действия других вредных факторов и условий жизни человека. Стохастические эффекты (злокачественные новообразования и генетические нарушения) обусловлены повреждением клеток на молекулярном уровне от случайного взаимодействия заряженной частицы излучения с молекулой ДНК. Такие последствия могут проявиться в отдаленные сроки при поражении даже одной клетки. Таким образом, вероятность возникновения нарушений в организме пропорциональна поглощенной дозе, а их тяжесть от величины дозы не зависит. Однако это всего лишь гипотеза, и многие исследователи с ней не согласны, так как, по данным эпидемиологических наблюдений и экспериментальных исследований, беспороговое действие радиации пока не подтверждено.

В 1977 г. в целях повышения уровня безопасности при использовании ионизирующего излучения и исходя из современных представлений о действии малых доз радиации, Международная комиссия радиационной защиты (МКРЗ) приняла концепцию *беспороговой линейной зависимости* возникновения злокачественных новообразований и генетических повреждений при нормировании радиационного фактора и оценки возможных неблагоприятных для здоровья отдаленных последствий облучения. Из этой концепции вытекают три основных принципа радиационной защиты, которые приняты в современном нормировании.

**Принцип обоснования.** Не должна проводиться любая деятельность, связанная с использованием источников ионизирующего излучения, если польза для отдельных лиц и общества в целом не превышает риска, вызванного дополнительным облучением (по отношению к естественному радиоактивному фону).

**Принцип оптимизации.** При использовании любого источника ионизирующего излучения индивидуальные дозы и число облучаемых людей должны поддерживаться на

столь низком уровне, насколько это возможно и достижимо с учетом экономических и социальных факторов.

Принцип *нормирования*. Индивидуальная доза облучения персонала и населения от всех источников ионизирующего излучения в процессе их эксплуатации не должна превышать действующих дозовых пределов.

Реализация первого принципа осуществляется путем обязательного лицензирования деятельности, связанной с возможным воздействием на людей ионизирующего излучения.

Второй принцип реализуется путем автоматизации технологических процессов, оптимизации труда и введения системы контрольных уровней. Контрольные уровни — это значения дозовых пределов и допустимых уровней, устанавливаемых руководством учреждения (предприятия) и местными органами Госсанэпиднадзора в целях максимально возможного снижения радиационного воздействия на персонал, население и объекты окружающей природной среды по отношению к регламентируемым нормативам и исходя из достигнутого уровня радиационной безопасности.

Третий принцип реализуется путем осуществления государственного надзора за обеспечением радиационной безопасности и установленным порядком ответственности за превышение регламентируемых дозовых пределов.

### **Нормы радиационной безопасности (НРБ99/2009)**

Радиационная безопасность персонала, населения и окружающей природной среды считается обеспеченной, если соблюдаются основные принципы радиационной безопасности (обоснование, оптимизация, нормирование) и требования радиационной защиты, установленные Федеральным законом от 9 января 1996г. № 3 «О радиационной безопасности населения», гигиеническими нормативами «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) СП 2.6.1.2523-09 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99/2010) СП 2.6.1.2612-10.

Основу системы радиационной безопасности, сформулированной в НРБ-99/2009, ОСПОРБ –99/2009 составляют современные международные научные рекомендации, опыт стран, достигших высокого уровня радиационной защиты населения, и отечественный опыт. Данные мировой науки показывают, что соблюдение Международных основных норм безопасности, которые легли в основу отечественных Норм, надежно гарантирует безопасность работающих с источниками излучения и всего населения.

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений

полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, в науке и медицине.

### **Требования к ограничению техногенного облучения в контролируемых условиях**

Устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал – лица, работающие с техногенными источниками излучения (группы А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б);
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД), приведенные в таблице 34;
- допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и другие;
- контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.). Их значения должны учитывать достигнутый в организации уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения. Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) - 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) - 70 мЗв.

При одновременном воздействии на человека источников внешнего и внутреннего облучения годовая эффективная доза не должна превышать пределов доз, установленных в таблице 34.

Таблица 34

Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год

Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза*** коже**** кистях и стопах	150мЗв 500 мЗв 500 мЗв	15мЗв 50мЗв 50мЗв
--	------------------------------	-------------------------

\* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

\*\* Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения персонала группы **Б**, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории персонал приводятся только для группы А.

\*\*\* Относится к дозе на глубине 300 мг/см<sup>2</sup>.

\*\*\*\* Относится к среднему по площади в 1 см<sup>2</sup> значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см<sup>2</sup> под покровным слоем толщиной 5 мг/см<sup>2</sup>. На ладонях, толщина покровного слоя — 40 мг/см<sup>2</sup>. Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см<sup>2</sup> площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.

Для персонала группы А значения ПГП и ДОА дочерних продуктов изотопов радона (<sup>222</sup>Rn и <sup>220</sup>Rn) - <sup>210</sup>Po (RaA); <sup>214</sup>Pb (RaB); <sup>214</sup>Bi (RaC); <sup>212</sup>Pb (ThB); <sup>212</sup>Bi (ThC) в единицах эквивалентной равновесной активности составляют:

$$\text{ПГП: } 0,10 \text{ П}_{\text{RaA}} + 0,52 \text{ П}_{\text{RaB}} + 0,38 \text{ П}_{\text{RaC}} = 3,0 \text{ МБк}$$

$$0,91 \text{ П}_{\text{ThB}} + 0,09 \text{ П}_{\text{ThC}} = 0,68 \text{ МБк}$$

$$\text{ДОА: } 0,10 \text{ А}_{\text{RaA}} + 0,52 \text{ А}_{\text{RaB}} + 0,38 \text{ А}_{\text{RaC}} = 1200 \text{ Бк/м}^3$$

$$0,91 \text{ А}_{\text{ThB}} + 0,09 \text{ А}_{\text{ThC}} = 270 \text{ Бк/м}^3,$$

где  $\text{П}_i$  и  $\text{А}_i$  - годовые поступления и среднегодовые объемные активности в зоне дыхания соответствующих дочерних продуктов изотопов радона.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала. В этих условиях эквивалентная доза облучения плода за 2 месяца невыявленной беременности не превысит 1 мЗв. Администрация предприятия обязана перевести беременную женщину на работу не связанную с источниками ионизирующего излучения, со дня ее информации о факте беременности, на период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

## **Требования к защите от природного облучения в производственных условиях**

Требования по обеспечению радиационной безопасности при воздействии природных источников излучения в производственных условиях предъявляются к любым организациям, в которых облучение работников от природных радионуклидов превышает 1 мЗв/год. К ним, в частности, относятся организации, осуществляющие работы в подземных условиях (неурановые рудники, шахты и др.), а также добывающие и перерабатывающие минеральное и органическое сырье с повышенным содержанием природных радионуклидов. В проектной документации неурановых рудников и других подземных сооружений должны быть отражены вопросы радиационной безопасности.

Организации, добывающие и перерабатывающие руды с целью извлечения из них природных радионуклидов (урана, радия, тория и др.), а также организации, использующие эти радионуклиды, относятся к организациям, проводящим работы с техногенными источниками излучения.

Эффективная доза облучения природными источниками излучения всех работников, включая персонал, не должна превышать 5 мЗв в год в производственных условиях (любые профессии и производства).

Для составления перечня действующих организаций, цехов или отдельных рабочих мест, на которых должен осуществляться контроль радиационной обстановки, обусловленной природными источниками излучения, следует проводить их первичное обследование. Если в результате обследования в организации не обнаружено случаев превышения дозы облучения работников в 1 мЗв/год, то дальнейший радиационный контроль в ней не является обязательным. Однако при существенном изменении технологии производства, которые могут привести к увеличению облучения работников, следует провести повторное обследование. В организациях, в которых установлено превышение дозы 1 мЗв/год, но нет превышения дозы в 2 мЗв/год, следует проводить выборочный радиационный контроль рабочих мест с наибольшими уровнями облучения работников. В организациях, в которых дозы облучения работников превышают 2 мЗв/год, должен, кроме того осуществляться постоянный контроль доз облучения и проводиться мероприятия по их снижению.

В случае обнаружения превышения установленного норматива (5 мЗв/год) администрация организации принимает все необходимые меры по снижению облучения работников. При невозможности соблюдения указанного норматива допускается приравнивание соответствующих работников по условиям труда к персоналу, работающему с техногенными источниками излучения. О принятом решении

администрация организации информирует органы государственного санитарно-эпидемиологического надзора. На лиц, приравненных по условиям труда к персоналу, работающему с техногенными источниками излучения, распространяются все требования по обеспечению радиационной безопасности, установленные для персонала группы А.

Средние значения радиационных факторов в течение года, соответствующие при монофакторном воздействии эффективной дозе 5 мЗв за год при продолжительности работы 2000 ч/год, средней скорости дыхания 1,2 м<sup>3</sup>/ч и радиоактивном равновесии радионуклидов уранового и ториевого рядов в производственной пыли, составляют:

- мощность эффективной дозы гамма-излучения на рабочем месте - 2,5 мкЗв/ч;
- ЭРОА<sub>Rn</sub> (эквивалентная равновесная объемная активность радона) в воздухе зоны дыхания - 310 Бк/м<sup>3</sup>;
- ЭРОА<sub>Tn</sub> (эквивалентная равновесная объемная активность торона) в воздухе зоны дыхания - 68 Бк/м<sup>3</sup>;
- удельная активность в производственной пыли урана-238, находящегося в радиоактивном равновесии с членами своего ряда - 40/f кБк/кг, где f- среднегодовая общая запыленность воздуха в зоне дыхания, мг/м<sup>3</sup> ;
- удельная активность в производственной пыли тория - 232, находящегося в радиоактивном равновесии с членами своего ряда, - 27/f, кБк/кг.

При многофакторном воздействии должно выполняться условие: сумма отношений воздействующих факторов к значениям, приведенным выше, не должна превышать 1.

В таблице 35 приведены значения допустимого радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи, спецодежды, спецобуви, средств индивидуальной защиты персонала. Для кожи, спецодежды, спецобуви, средств индивидуальной защиты нормируется общее радиоактивное загрязнение (снимаемое и неснимаемое). В остальных случаях нормируется только снимаемое загрязнение.

Таблица 35

Допустимые уровни радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи, спецодежды и средств индивидуальной защиты, част/(см<sup>2</sup> х мин)

Объект загрязнения	Альфа-активные нуклиды*		Бета- активные нуклиды
	отдельные**	прочие	
Неповрежденная кожа, спецбелье, полотенца, внутренняя поверхность лицевых частей средств индивидуальной защиты	2	2	200***

Основная спецодежда, внутренняя поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, наружная поверхность спецобуви	5	20	2000
Поверхности помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования	5	20	2000
Поверхности помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования	50	200	10000
Наружная поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, снимаемой в саншлюзах	50	200	10000

*Примечания.\* Для поверхности рабочих помещений и оборудования, загрязненных альфа-активными радионуклидами, нормируется снимаемое (нефиксированное) загрязнение; для остальных поверхностей — суммарное (снимаемое и неснимаемое) загрязнение.*

*\*\* К отдельным относятся альфа-активные нуклиды, среднегодовая допустимая объемная активность которых в воздухе рабочих помещений ДООА < 0,3 Бк/м<sup>3</sup>.*

*\*\*\* Установлены следующие значения допустимых уровней загрязнения кожи, спецбелья и внутренней поверхности лицевых частей средств индивидуальной защиты для отдельных радионуклидов:*

*• для Sr-90 + Y-90 - 40 част/(см<sup>2</sup>хмин.).*

### **Требования к ограничению облучения населения**

Радиационная безопасность населения достигается путем ограничения воздействия от всех основных видов облучения. Возможности регулирования разных видов облучения существенно различаются, поэтому регламентация их осуществляется отдельно с применением разных методологических подходов и технических способов.

В отношении всех источников облучения населения следует принимать меры как по снижению дозы облучения у отдельных лиц, так и по уменьшению числа лиц, подвергающихся облучению, в соответствии с принципом оптимизации.

Требования по обеспечению радиационной безопасности населения распространяются на регулируемые природные источники излучения: изотопы радона и продукты их распада в воздухе помещений, гамма-излучение природных радионуклидов, содержащихся в строительных изделиях, природные радионуклиды в питьевой воде, удобрениях и полезных ископаемых. Органы исполнительной власти субъектов Российской Федерации планируют и проводят работы по оценке и снижению уровней облучения населения природными



источниками излучения. Сведения об уровнях облучения населения природными источниками излучения заносятся в радиационно-гигиенические паспорта территорий.

Относительную степень радиационной безопасности населения характеризуют следующие значения эффективных доз от природных источников излучения:

- менее 2 мЗв/год - облучение не превышает средних значений доз для населения страны от природных источников излучения;
- от 2 до 5 мЗв/год - повышенное облучение;
- более 5 мЗв/год - высокое облучение.

Мероприятия по снижению высоких уровней облучения должны осуществляться в первоочередном порядке. Годовая доза облучения населения не должна превышать основные пределы доз (табл. 7). Указанные пределы доз относятся к средней дозе критической группы населения, рассматриваемой как сумма доз внешнего облучения за текущий год и ожидаемой дозы до 70 лет вследствие поступления радионуклидов в организм за текущий год.

Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения от отдельных природных источников излучения. При содержании природных и искусственных радионуклидов в питьевой воде, создающих эффективную дозу меньше 0,1 мЗв за год, не требуется проведения мероприятий по снижению ее радиоактивности. Предварительная оценка допустимости использования воды для питьевых целей может быть дана по удельной суммарной альфа ( $A_\alpha$ )- и бета ( $A_\beta$ )-активности, которая не должна превышать 0,1 и 1,0 Бк/кг, соответственно. Уровень вмешательства для  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде составляет 60 Бк/кг.

*Примечание: Критическим путем облучения людей за счет радона, содержащегося в питьевой воде, является переход радона в воздух помещения и последующее ингаляционное поступление дочерних продуктов радона.*

Для минеральных и лечебных вод устанавливаются специальные нормативы.

### **Вопросы и задания**

1. Какие основные принципы обеспечения радиационной безопасности
2. В чем заключается принцип обоснования.
3. В чем заключается принцип оптимизации.
4. В чем заключается принцип нормирования.
5. Какие требования предъявляются к ограничению техногенного облучения в контролируемых условиях.
6. Дайте определение персоналу ( группа А).
7. Дайте определение персоналу ( группа Б).

8. Какие классы нормативов устанавливаются для категорий облучаемых лиц
  9. Что такое ППП.
  10. Что такое ДОО.
  11. Что такое ЭРОА<sub>Рп</sub>.
  12. Какие требования предъявляются к защите от природного облучения в производственных условиях
  13. Какие требования предъявляются к ограничению облучения населения
- Подготовить реферат (Приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2. Выполнить лабораторную работу (Приложение 4)

### **Список литературы**

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
4. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
5. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП2.6.1.2523-09,2009.
7. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99).СП 2.6.1.799-99. Минздрав России, 2000.
8. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационно-экологический мониторинг окружающей среды. Казань: Издательство КГУ, 2009.-40с.
9. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Казань: Издательство КГУ, 2009.-44с.
10. *Сердюкова А.С., Иванова Т.М.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Учебное пособие. М. : МГГА, 2001.-77с.
11. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
12. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
13. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.

### **Использованные информационные ресурсы**

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

### Лекция 13.

#### Радиационный мониторинг

**Аннотация.** В данной лекции рассматриваются вопросы организации радиационного контроля и обращения с материалами и изделиями, загрязненными или содержащими радионуклиды.

**Ключевые слова.** Мощность дозы внешнего гамма-излучения /МЭД/, интенсивность эксхалации, удельная активность, среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность, радон, торон, энергия дочерних продуктов распада радона, удельная эффективная активность (Аэфф.)

##### **Методические рекомендации по изучению темы**

- Тема содержит лекционную часть, где даются общие представления по теме;
- В качестве самостоятельной работы предлагается написать рефераты по проблемам радиационной экологии и выступить с устными докладами.
- Для проверки усвоения темы имеются задачи и вопросы к лекции
- Выполнить лабораторную работу (Приложение )

Радиационный мониторинг является составной частью мониторинга окружающей среды и базируется на основных его положениях – наблюдения, контроля, прогноза и главных задачах:

- организации широких наблюдениях за изменением состояния биосферы;
- обнаружении источников воздействия и причин изменений;
- оценки наблюдаемых изменений и выявлении антропогенных эффектов;
- прогнозе в изменении состоянии биосферы.

Для организации системы наблюдения и контроля необходимо получение детальной информации о состоянии окружающей среды. Осуществление мониторинга предусматривает получение такой информации, элементами которой являются:

- наблюдение за факторами, воздействующими на окружающую среду;
- оценка фактического состояния окружающей среды;
- прогноз состояния окружающей среды.

На основе этих общих элементов мониторинга окружающей среды созданы свои конкретные принципы радиоэкологического мониторинга. Основными задачами которого являются:

- получение и анализ информации по обеспечению требований радиационной безопасности населения, персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения при добыче, переработке, изготовлении, использовании и ликвидации источников ионизирующих излучений, удалении и переработке радиоактивных отходов;
- обоснование, организация и контроль за проведением мероприятий по оптимизации условий радиационной безопасности.

Для выполнения этих задач осуществляется предупредительный, текущий экологический и санитарный надзор и контроль за радиоактивностью окружающей среды, методическая работа.

Основными задачами предупредительного экологического и санитарного надзора являются:

- экспертная оценка соответствия проектируемых, создаваемых, вводимых в эксплуатацию учреждений, применяющих источники ионизирующих излучений, действующим экологическим и санитарно-гигиеническим нормам и правилам;
- обоснование и контроль за соблюдением экологических, санитарно-гигиенических рекомендаций по оптимизации системы радиационной безопасности;
- рассмотрение и подготовка заключений по технической документации на установки, приборы, аппараты и другую радиационную технику, а также защитное и технологическое оборудование;
- обследование учреждений, предприятий и прочих объектов, в целях установления наличия условий для проведения работ с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений;

Основными задачами текущего экологического и санитарного надзора являются:

- надзор за своевременным выявлением и устранением неблагоприятных изменений условий радиационной безопасности в учреждении, ведомстве или территории;
- надзор за своевременным приведением условий радиационной безопасности в соответствие с утвержденным законодательством и другими регламентирующими документами.

Основными задачами контроля за радиоактивностью окружающей среды являются:

- выявление источников радиационного воздействия естественной и искусственной природы на население;
- определение контрольных участков и систематическое проведение необходимых дозиметрических, радиометрических и радиохимических исследований различных объектов внешней среды (атмосферного воздуха, воды, почвы, пищевых продуктов и др.) на обследуемой территории;
- измерение гамма-фона на контролируемой территории.

### **Нормирование и организация радиационного контроля при отводе территорий под строительство**

На стадии землеотвода участков территорий под строительство жилых и общественных зданий и сооружений контролируемыми параметрами являются:

- мощность дозы внешнего гамма-излучения /МЭД/, которая должна быть представлена в единицах мощности эквивалентной дозы мкЗв/ч (допускается ее представление в единицах мощности экспозиционной дозы в мкР/ч);

- интенсивность эксгаляции (плотность потока) радона из почв, измеряемая в мБк / (м<sup>2</sup>хс) и объемная активность радона в почвенном воздухе /ОА/, измеряемая в кБк/куб.м.;

- удельная активность проб грунта с территорий, отводимых под строительство, измеряемая в Бк/кг или Ки/кг для альфа- и бета-излучающих радионуклидов и трансурановых элементов и в г-экв радия/кг для гамма-излучающих радионуклидов.

Для строительства зданий производственного назначения следует выбирать участки территории, где плотность потока радона с поверхности грунта не превышает 250 мБк / (м<sup>2</sup>хс). При проектировании строительства здания на участке с плотностью потока радона с поверхности грунта более 250 мБк / (м<sup>2</sup>хс) в проекте здания должна быть представлена система защиты от радона.

При выборе участков территорий под строительство жилых домов и зданий социально-бытового назначения предпочтительны участки с гамма-фоном, не превышающим 0,3 мкГр/ч и плотностью потока радона с поверхности грунта не более 80 мБк/(м<sup>2</sup>хс). При отводе для строительства здания участка с плотностью потока радона более 80 мБк / (м<sup>2</sup>хс) в проекте здания должна быть предусмотрена, система защиты от радона (монолитная бетонная подушка, улучшенная изоляция перекрытия подвального помещения и др.). Необходимость радонозащитных мероприятий при плотности потока радона с поверхности грунта менее 80 мБк / (м<sup>2</sup>хс) определяется в каждом отдельном случае по согласованию с органом государственной санитарно-эпидемиологической службы.

Производственный радиационный контроль должен осуществляться на всех стадиях строительства, реконструкции, капитального ремонта и эксплуатации жилых домов и зданий социально-бытового назначения с целью проверки соответствия действующим нормативам. В случаях обнаружения превышения нормативных значений должен проводиться анализ связанных с этим причин и осуществляться необходимые защитные мероприятия, направленные на снижение мощности дозы гамма-излучения и (или) содержания радона в воздухе помещений. До снижения мощности дозы гамма-излучения и объемной активности радона в воздухе помещений строящегося, реконструируемого или капитально ремонтируемого здания до нормативных значений, здание или его часть не подлежат приему в эксплуатацию органами государственного санитарно-эпидемиологического надзора.

Для оценки радиационного качества участков территорий, отводимых под строительство, проводится дозиметрическое обследование (поисковая гамма-съемка территории застройки с оформлением картографических материалов) и радиометрические или гамма-спектрометрические исследования проб грунта (шпуровая гамма-съемка) с целью установления уровней гамма-фона, удельной активности грунта и выявления возможного радиоактивного загрязнения естественными и искусственными радионуклидами. При обнаружении участков с уровнями гамма-излучения, превышающими основной фон, присущий данной местности, более чем на 0,05 мкЗв/ч (5 мкР/ч), но не более, чем на 0,3 мкЗв/ч (33 мкР/ч) проводятся дополнительные исследования для выяснения причины такого повышения и определения характера дальнейшего реагирования (регистрация или вмешательство). При обнаружении участков с уровнями гамма-излучения превышающими основной фон, присущий данной местности, более чем на 0,3 мкЗв/ч (33 мкР/ч), ставятся в известность органы Госсанэпиднадзора, которые проводят дополнительные исследования и организуют, в случае необходимости, проведение дезактивационных работ.

#### **Нормирование и организация радиационного контроля жилых и общественных зданий и сооружений**

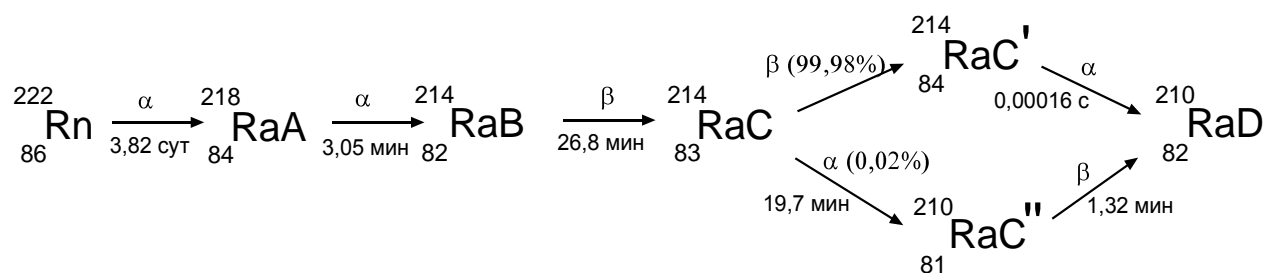
На стадии приемки зданий в эксплуатацию и в эксплуатируемых зданиях контролируемыми параметрами являются:

- мощность дозы внешнего гамма-излучения /МЭД/ на открытой местности и в помещениях построенных и эксплуатируемых зданий, которая должна быть представлена в единицах мощности эквивалентной дозы мкЗв/ч (допускается ее представление в единицах мощности экспозиционной дозы в мкР/ч);
- среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) изотопов радона в воздухе помещений, которая определяется по результатам измерения  $ЭРОА_{Rn}$  и  $ЭРОА_{Tn}$  и рассчитывается по формуле:

$$A_{эkv.} = ЭРОА_{Rn} + 4,6 ЭРОА_{Tn} .$$

Радон – инертный газ. Для дозиметрии представляют интерес два изотопа радона -  $^{222}$ (радон) и  $^{220}$  (торон)

Схема распада радона-222 и образования ДПР:



В воздухе, первоначально содержавшем только радон 222, равновесие между ним и короткоживущими продуктами распада устанавливается примерно через 3 ч. Все дочерние продукты радона, включая RaC' (RaC" обычно не рассматривается в связи с малой вероятностью перехода RaC—RaC"), являются короткоживущими изотопами, RaD, RaE и RaF (Po210)—долгоживущими.

В таблице 36 приведены основные характеристики эманаций и их дочерних продуктов.

Таблица 36

Характеристики распада радона-222 и его короткоживущих дочерних продуктов

Радио- нуклид	Период полу- распада	Основные линии излучения и выход (y)					
		Альфа		Бета		Гамма	
		Энергия (МэВ)	y (%)	Энергия (МэВ)	y (%)	Энергия (МэВ)	y (%)
<sup>222</sup> Rn	3.824 сут	5.49	100	-	-	-	-
<sup>218</sup> Po RaA	3.05 мин	6.00	100	-	-	-	-
<sup>214</sup> Pb RaB	26.8 мин			1.02 0.70 0.65	6 42 48	0.35 0.30 0.24	37 19 8
<sup>214</sup> Bi RaC	19.9 мин			3.27 1.54 1.51	18 18 18	0.61 1.77 1.12	46 16 15
<sup>214</sup> Po RaC'	164 мкс	7.69	100	-	-	-	-

Среди короткоживущих продуктов распада радона есть  $\alpha$ -излучатели (<sup>214</sup>Po, <sup>218</sup>Po),  $\beta$ -излучатели (<sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Pb) и  $\gamma$ -излучатели (<sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Pb). Некоторое время после образования продукты распада могут существовать в виде свободных атомов или положительно заряженных ионов. Продукты распада радона легко адсорбируются различными поверхностями или аэрозольными частицами. Средняя продолжительность жизни свободных атомов определяется в основном концентрацией и дисперсностью

аэрозольных частиц и, по данным разных авторов, составляет 9-44с, а концентрация их, выраженная в единицах равновесного радона, изменяется от 0 до 73% .

Характеристика дочерних продуктов распада радона-222 и торона 220 приведены в таблицах 37 и 38.

Таблица 37

Характеристика дочерних продуктов распада радона-222

РН	$\lambda, \text{с}^{-1}$	$N = \frac{dN}{\lambda}, \text{ат.Бк}^{-1}$	$E_{\alpha}, \text{МэВ.ат.}^{-1}$
$^{218}_{84}\text{RaA}$	$3,788 \cdot 10^{-3}$	264	6,002
$^{214}_{82}\text{RaB}$	$4,311 \cdot 10^{-4}$	2320	7,695
$^{214}_{83}\text{RaC}$	$5,86 \cdot 10^{-4}$	1705	7,695

Схема распада радона-220 и образования его ДПР может быть представлена как

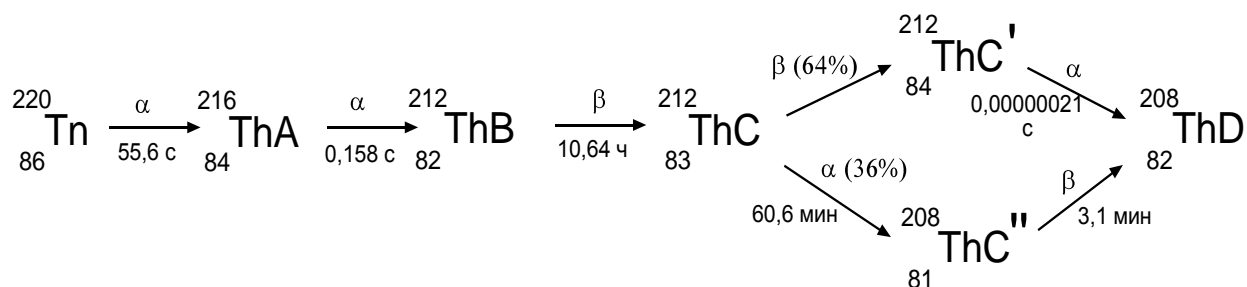


Таблица 38

Характеристика дочерних продуктов распада радона-220.

РН	$\lambda, \text{с}^{-1}$	$N = \frac{dN}{\lambda}, \text{ат.Бк}^{-1}$	$E_{\alpha}, \text{МэВ.ат.}^{-1}$
$^{216}_{84}\text{ThA}$	4,387	0,228	6,774
$^{212}_{82}\text{ThB}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$	$5,525 \cdot 10^4$	7,89
$^{212}_{83}\text{ThC}$	$1,906 \cdot 10^{-4}$	$5,247 \cdot 10^3$	7,89

При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних изотопов радона и торона в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м<sup>3</sup>, а мощность эффективной дозы гамма-излучения не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.



В эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних изотопов радона и торона в воздухе жилых помещений не должна превышать  $200 \text{ Бк/м}^3$ . При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений. Защитные мероприятия должны проводиться также, если мощность эффективной дозы гамма-излучения в помещениях превышает мощность дозы на открытой местности более чем на  $0,2 \text{ мкЗв/ч}$ . Для существующих зданий радиационный контроль должен осуществляться в штатном режиме эксплуатации и предусматривать получение информации о степени соответствия значения каждого из регламентируемых параметров принятому нормативному значению.

Для строящихся зданий, реконструируемых и сдаваемых в эксплуатацию после капитального ремонта радиационный контроль должен быть предусмотрен на всех стадиях - проектирования, землеотвода (выборе участка для застройки), строительства (контроль сырья и материалов) и сдачи в эксплуатацию.

Лабораторией радиационного контроля производятся измерения мощности дозы гамма-излучения в каждом помещении здания, которое сдается в эксплуатацию, до окончания отделочных работ с оформлением результатов измерения в виде протокола, указанием прибора, которым производились измерения, и даты его государственной поверки.

В жилых и общественных зданиях и сооружениях регламентируется превышение мощности эквивалентной /экспозиционной/ дозы внешнего гамма-излучения /МЭД/ в помещениях над мощностью дозы на открытой местности на прилегающей территории и среднегодовое значение эквивалентной равновесной объемной активности изотопов радона в воздухе. Мощность дозы внешнего гамма-излучения /МЭД/ в помещениях, рассчитанных на длительное пребывание людей, не должна превышать мощности дозы на открытой местности на прилегающей территории более, чем на  $0,3 \text{ мкЗв/ч}$  ( $33 \text{ мкР/ч}$ ). Перед проведением обследования помещений определяют мощность дозы внешнего гамма-излучения на открытой местности вблизи контролируемого здания. При этом выбирают участки с естественным покрытием без значительных техногенных воздействий (сады, парки, газоны, пустыри и т.д.) на расстоянии не менее 30 м от близлежащих зданий.

Если мощность дозы внешнего гамма-излучения в здании (части помещений здания), принимаемого в эксплуатацию, превышает мощность дозы на открытом воздухе более чем на  $0,3 \text{ мкЗв/ч}$ , ставятся в известность органы Госсанэпиднадзора, проводятся дополнительные исследования и принимается решение о проведении мероприятий по ее

снижению. После завершения защитных мероприятий проводится повторное, детальное обследование здания (части помещений здания) с целью оценки их достаточности либо необходимости дополнительных мероприятий. Здание может быть сдано в эксплуатацию полностью или частично, если по результатам повторных измерений МЭД гамма-излучения не будет превышать установленного норматива.

При невозможности в новых зданиях снизить превышение мощности дозы гамма-излучения над гамма-фоном открытой местности до нормативного уровня без нарушения целостности здания, по согласованию с органами Госсанэпиднадзора должен рассматриваться вопрос о перепрофилировании здания (части помещений здания).

Измерения во вновь строящихся и реконструируемых зданиях проводятся в подвальных, полуподвальных помещениях и в помещениях каждого из этажей здания после их предварительной выдержки (не менее суток) при закрытых окнах, дверях и отключенной вентиляции. Измерения рекомендуется проводить при наиболее высоком для данной местности барометрическом давлении и слабом ветре. Количество точек контроля должно быть не менее трех в подвальных, полуподвальных помещениях, не менее пяти в помещениях первого этажа каждого из подъездов и не менее одной на каждом из верхних этажей (второго и выше). Количество измерений при использовании мониторов радона в каждой контрольной точке должно быть не менее трех.

Если результаты измерений превышают нормативные значения, то ставятся в известность органы Госсанэпиднадзора, которые проводят детальное обследование здания. При этом количество контрольных точек увеличивается не менее чем в 5 раз, а для определения ЭРОА изотопов радона используются интегральные трековые, диффузионные, электрентные методы или методы непрерывного мониторингирования. Измерения проводятся дробно по 3-4 измерения, при общей продолжительности измерений не менее 15 суток.

После завершения защитных мероприятий проводится повторное детальное обследование помещений с целью оценки их достаточности либо необходимости дополнительных мероприятий.

В зависимости от измеренных значений ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений по согласованию с Госсанэпиднадзором может быть принято решение о сдаче части здания в эксплуатацию с обязательным указанием на необходимость проведения интегральных измерений в разные сезоны года в непринятых частях здания. При невозможности в результате экономически обоснованных защитных мероприятий уменьшить ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений здания до значений ниже 100 Бк/куб.м. следует

рассматривать возможность перепрофилирования здания или тех его помещений, где после проведенных защитных мероприятий норматив остался превышенным.

### **Нормирование и организация радиационного контроля радиоактивности строительных материалов**

На стадии добычи и изготовления строительных материалов и изделий контролируемые параметрами являются:

- мощность дозы внешнего гамма-излучения на территории карьера и от добываемых, поставляемых и изготавливаемых строительных сырья, материалов и изделий, которая должна быть представлена в единицах мощности эквивалентной дозы мкЗв/ч (допускается ее представление в единицах мощности экспозиционной дозы в мкР/ч);

- удельная эффективная активность (Аэфф.) ЕРН в строительных материалах, добываемых на месторождениях или вырабатываемых на предприятии, или являющихся побочными продуктами промышленности, а также отходы промышленного производства, используемые для изготовления строительных материалов, измеряемая в Бк/кг.

Удельная эффективная активность (Аэфф.) ЕРН в строительных материалах (сырье), добываемых на их месторождениях (щебень, гравий, песок, бутовый и пиленный камень, цементное и кирпичное сырье и пр.) или являющихся побочным продуктом промышленности, а также в отходах промышленного производства, используемых для изготовления строительных материалов (зола, шлаки и пр.) не должна превышать:

Для материалов, используемых во вновь строящихся жилых и общественных зданиях (I класс):

$$A_{\text{эфф.}} = A_{\text{Ra}} + 1,3A_{\text{Th}} + 0,09 A_{\text{K}} \leq 370 \text{ Бк/кг},$$

где  $A_{\text{Ra}}$  и  $A_{\text{Th}}$  - удельная активность Ra-226 и Th-232, находящихся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого семейства, а  $A_{\text{K}}$  - удельная активность K-40, (Бк/кг);

Для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений (II класс):

$$A_{\text{эфф.}} \leq 740 \text{ Бк/кг};$$

Для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс):

$$A_{\text{эфф.}} \leq 1500 \text{ Бк/кг};$$

При  $1,5 \text{ кБк/кг} < A_{\text{эфф.}} < 4,0 \text{ кБк/кг}$  (IV класс) вопрос об использовании материалов решается в каждом случае отдельно по согласованию с федеральным органом

Госсанэпиднадзора. При  $A_{эфф} > 4,0$  кБк/кг материалы не должны использоваться в строительстве.

Применение материалов с содержанием ЕРН по II и III классам, а также использование отходов промышленного производства (шлаки, зола и др.) для изготовления строительных материалов, допускается только по согласованию с органами Госсанэпиднадзора. Каждая партия всех видов строительного сырья и материалов, поступающая на предприятие, должна иметь сертификат радиационного качества, в котором должны быть приведены значения удельной активности естественных радионуклидов и удельной эффективной активности на каждый вид поставляемого материала.

Ведомственный контроль радиационного качества строительного сырья, материалов и изделий на предприятии-изготовителе строительных материалов и изделий подразделяется на следующие виды:

- входной радиационный контроль, осуществляемый с целью проверки соответствия радиационного качества поступившего сырья (материалов) указанному в сертификатах;
- выходной радиационный контроль, осуществляемый с целью проверки радиационного качества получаемой выходной продукции предприятия.

Входной и выходной радиационный контроль возлагается на администрацию предприятия и осуществляется службой радиационного контроля предприятия либо сторонней аккредитованной лабораторией по согласованию с Госсанэпиднадзором.

Производственному радиационному контролю подлежат, также, вспомогательные материалы (суперпластификаторы, нитрат натрия, эмульсол, опилки и др. вещества) и арматурная сталь. Контроль вспомогательных материалов (за исключением металла) осуществляется только лабораторным гамма-спектрометрическим методом и не носит систематического характера (исследования проводятся только в тех случаях, когда имеется информация о возможности техногенного загрязнения указанных веществ, например при получении этого сырья с территорий, пострадавших в результате радиационных аварий).

Контроль арматурной стали осуществляется на территории склада хранения металла по мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Дозиметрической экспресс-оценке подлежит каждая партия поступающего металла (кипы прутков или бухты). При превышении мощности экспозиционной дозы гамма-излучения над уровнем естественного гамма-фона более, чем на  $0,05$  мкЗв/ч ( $5$  мкР/ч) решение о возможности его использования принимается органами Госсанэпиднадзора.

На выходную продукцию администрация предприятия изготовителя обязана оформить гигиенический сертификат радиационного качества, который передается потребителю продукции. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов в выходной продукции рассчитывается по значениям Аэфф в компонентах этой продукции с учетом массовой доли этих компонентов. При выходном контроле на предприятии проверяется соответствие Аэфф в выходной продукции предприятия расчетному значению.

Удельная активность природных радионуклидов в фосфорных удобрениях и мелиорантах не должна превышать:

$$A_U + 1,5A_{Th} \leq 4,0 \text{ кБк/кг},$$

где  $A_U$  и  $A_{Th}$  - удельные активности урана-238 (радия-226) и тория-232 (тория-228), находящихся в радиоактивном равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, соответственно.

### **Обращение с материалами и изделиями, загрязненными или содержащими радионуклиды**

Материалы и изделия с низкими уровнями содержания радионуклидов допускается использовать в хозяйственной деятельности. Критерием для принятия решения о возможном применении в хозяйственной деятельности сырья, материалов и изделий, содержащих радионуклиды, является ожидаемая индивидуальная годовая эффективная доза облучения, которая при планируемом виде их использования не должна превышать 10 мкЗв, а годовая коллективная эффективная доза не должна быть более 1 чел.-Зв.

Не допускается наличие нефиксированного (снимаемого) радиоактивного загрязнения поверхности материалов и изделий (металл, древесина и др.), поступающих для использования в хозяйственной деятельности.

Не вводится никаких ограничений на использование в хозяйственной деятельности любых твердых материалов, сырья и изделий при удельной активности радионуклидов в них менее 0,3 кБк/кг. По согласованию с федеральным органом, уполномоченным осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор, для отдельных бета-излучающих радионуклидов могут быть установлены более высокие значения удельной активности сырья, материалов и изделий, годных для неограниченного использования.

Сырье, материалы и изделия с удельной бета-активностью от 0,3 до 100 кБк/кг, или с удельной альфа-активностью от 0,3 до 10 кБк/кг, или с содержанием трансурановых радионуклидов от 0,3 до 1,0 кБк/кг могут ограниченно использоваться только на основании санитарно-эпидемиологического заключения органов государственного санитарно-

эпидемиологического надзора на определенный вид применения. Эти материалы подлежат обязательному радиационному контролю. Предназначенные для дальнейшего использования по прямому назначению материалы и изделия, содержащие радиоактивные вещества выше этих уровней, подлежат дезактивации. Дезактивацию следует проводить в тех случаях, когда уровень загрязненности материалов и изделий может быть снижен до допустимых значений, обеспечивающих их дальнейшее применение.

В случае невозможности или нецелесообразности использования сырья, материалов и изделий, отнесенных к категории ограниченного использования, они направляются на специально выделенные участки в места захоронения промышленных отходов. Эти материалы не должны иметь снимаемого радиоактивного загрязнения.

Санитарно-гигиенические условия использования в хозяйственной деятельности полезных ископаемых с повышенным содержанием природных радионуклидов определяются федеральным органом исполнительной власти, уполномоченным осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор. В организациях, в которых отходы производства относятся к категории радиоактивных, должен быть организован их сбор, временное хранение и захоронение.

### **Обращение с радиоактивными отходами**

Радиоактивные отходы по агрегатному состоянию подразделяются на жидкие, твердые и газообразные.

К жидким радиоактивным отходам относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, в которых удельная активность радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства при поступлении с водой, приведенные в приложении П-2 НРБ-99/2009.

К твердым радиоактивным отходам относятся отработавшие свои ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные жидкие радиоактивные отходы, в которых удельная активность радионуклидов больше значений, приведенных в приложении П-4 НРБ-99/2009, а при неизвестном радионуклидном составе удельная активность больше:

- 100 кБк/кг - для источников бета-излучения;

- 10 кБк/кг - для источников альфа-излучения;

- 1,0 кБк/кг - для трансурановых радионуклидов. К газообразным радиоактивным отходам относятся не подлежащие использованию радиоактивные газы и аэрозоли,

образующиеся при производственных процессах с объемной активностью, превышающей ДОА, значения которой приведены в приложении П-2 НРБ-99/2009.

Радиоактивные отходы подразделяются по удельной активности на 3 категории - низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные (табл. 39).

В случае, когда по приведенным характеристикам радионуклидов таблицы 4 отходы относятся к разным категориям, устанавливается для них наиболее высокое значение категории отходов.

Таблица 39

Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов

Категория отходов	Удельная активность, кБк/кг		
	бета-излучающие радионуклиды	альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	менее $10^3$	менее $10^2$	менее $10^1$
Среднеактивные	от $10^3$ до $10^7$	от $10^2$ до $10^6$	от $10^1$ до $10^5$
Высокоактивные	более $10^7$	более $10^6$	более $10^5$

Система обращения с радиоактивными отходами в местах их образования определяется проектом для каждой организации, планирующей работы с открытыми источниками излучения. Проведение работ с радиоактивными веществами без наличия условий для сбора и временного хранения радиоактивных отходов не допускается. Газообразные радиоактивные отходы подлежат выдержке и (или) очистке на фильтрах с целью снижения их активности до уровней регламентируемых допустимым выбросом, после чего могут быть удалены в атмосферу. Система обращения с жидкими и твердыми радиоактивными отходами включает их сбор, сортировку, упаковку, временное хранение, кондиционирование (концентрирование, отверждение, прессование, сжигание), транспортирование, длительное хранение и (или) захоронение.

Сбор радиоактивных отходов в организациях должен производиться непосредственно в местах их образования отдельно от обычных отходов с учетом:

- - категории отходов;
- - агрегатного состояния (твердые, жидкие);
- - физических и химических характеристик;
- - природы (органические и неорганические);
- - периода полураспада радионуклидов, находящихся в отходах (менее 15 суток, более 15 суток);

- - взрыво- и огнеопасности;
- - принятых методов переработки отходов.

Для сбора радиоактивных отходов в организации должны быть специальные сборники. Для первичного сбора твердых радиоактивных отходов могут быть использованы пластиковые или бумажные мешки, которые затем загружаются в сборники-контейнеры. Места расположения сборников при необходимости должны обеспечиваться защитными приспособлениями для снижения излучения за их пределами до допустимого уровня.

Для временного хранения и выдержки сборников с радиоактивными отходами, создающими у поверхности дозу гамма-излучения более 2 мГр/ч, должны использоваться специальные защитные колодцы или ниши. Извлечение сборников отходов из колодцев и ниш необходимо производить с помощью специальных устройств, исключающих переоблучение обслуживающего персонала.

Жидкие радиоактивные отходы должны собираться в специальные емкости. Их следует, по возможности, концентрировать и отверждать в организации, где они образуются или в специализированной организации по обращению с радиоактивными отходами, после чего направлять на захоронение. В организациях, где возможно образование значительного количества жидких радиоактивных отходов (более 200 л в день), проектом должна быть предусмотрена система спецканализации. В спецканализацию не должны попадать нерадиоактивные стоки. Запрещается сброс жидких радиоактивных отходов в хозяйственно-бытовую и ливневую канализацию, водоемы, поглощающие ямы, колодцы, скважины, на поля орошения, поля фильтрации, в системы подземного орошения и на поверхность земли.

Радиоактивные отходы, содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 15 суток, собираются отдельно от других радиоактивных отходов и выдерживаются в местах временного хранения для снижения активности до допустимых уровней. После такой выдержки твердые отходы удаляются как обычные промышленные отходы, а жидкие отходы могут использоваться организацией в системе оборотного хозяйственно-технического водоснабжения или сливаться в хозяйственно-бытовую канализацию.

Самовоспламеняющиеся и взрывоопасные радиоактивные отходы должны быть переведены в неопасное состояние до отправки на захоронение, при этом должны быть предусмотрены меры радиационной и пожарной безопасности.

Передача радиоактивных отходов из организации на переработку или захоронение должна производиться в специальных контейнерах и оформляться актом.



Захоронение высокоактивных, среднеактивных и низкоактивных отходов должно осуществляться отдельно. Выбор мест захоронения радиоактивных отходов должен производиться с учетом гидрогеологических, геоморфологических, тектонических и сейсмических условий. При этом должна быть обеспечена радиационная безопасность населения и окружающей среды и течение всего срока изоляции отходов с учетом долговременного прогноза.

Эффективная доза облучения населения, обусловленная радиоактивными отходами, включая этапы хранения и захоронения, не должна превышать 10 мЗв/год.

### **Критерии вмешательства на загрязненных территориях**

Защита населения на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, осуществляется путем вмешательства на основе принципов безопасности при вмешательстве. При любых восстановительных действиях необходимо обеспечить непревышение уровня пороговых детерминированных эффектов у населения.

Числовые значения критериев вмешательства для территорий, загрязненных в результате радиационных аварий, и вмешательства при обнаружении локальных радиоактивных загрязнений ("последствий прежней деятельности") различаются.

*Критерии вмешательства на территориях, загрязненных в результате радиационных аварий.* На разных стадиях аварии вмешательство регулируется зонированием загрязненных территорий, основанным на величине годовой эффективной дозы, которая может быть получена жителями в отсутствии мер радиационной защиты. Под годовой дозой здесь понимается эффективная доза, средняя у жителей населенного пункта за текущий год, обусловленная искусственными радионуклидами, поступившими в окружающую среду в результате радиационной аварии. На территории, где годовая эффективная доза не превышает 1 мЗв, производится обычный контроль радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды и сельскохозяйственной продукции, по результатам которого оценивается доза облучения населения. Проживание и хозяйственная деятельность населения на этой территории по радиационному фактору не ограничивается. Эта территория не относится к зонам радиоактивного загрязнения. При величине годовой дозы более 1 мЗв загрязненные территории по характеру необходимого контроля обстановки и защитных мероприятий подразделяются на зоны.

1. *Зоны радиационного контроля* — от 1 мЗв до 5 мЗв. В этой зоне помимо мониторинга радиоактивности объектов окружающей среды, сельскохозяйственной продукции и доз внешнего и внутреннего облучения населения и его критических групп

осуществляются меры по снижению доз на основе принципа оптимизации и другие необходимые активные меры защиты населения.

2. *Зона ограниченного проживания населения* — от 5 мЗв до 20 мЗв. В этой зоне осуществляются те же меры мониторинга и защиты населения, что и в зоне радиационного контроля. Добровольный въезд на указанную территорию для постоянного проживания не ограничивается. Лицам, въезжающим на указанную территорию для постоянного проживания, разъясняется риск ущерба здоровью, обусловленный воздействием радиации.

3. *Зона отселения* - от 20 мЗв до 50 мЗв. Въезд на указанную территорию для постоянного проживания не разрешен. В этой зоне запрещается постоянное проживание лиц репродуктивного возраста и детей. Здесь осуществляется радиационный мониторинг людей и объектов внешней среды, а также необходимые меры радиационной и медицинской защиты.

4. *Зона отчуждения* - более 50 мЗв. В этой зоне постоянное проживание не допускается, а хозяйственная деятельность и природопользование регулируются специальными актами. Осуществляются меры мониторинга и защиты работающих с обязательным и индивидуальным дозиметрическим контролем.

*Критерии вмешательства при обнаружении локальных радиоактивных загрязнений.*

1. Уровень исследования - от 0,01 до 0,3 мЗв/год. Это такой уровень радиационного воздействия источника на население, при достижении которого требуется выполнить исследование источника с целью уточнения оценки величины годовой эффективной дозы и определения величины дозы, ожидаемой за 70 лет.

2. Уровень вмешательства - более 0,3 мЗв/год. Это такой уровень радиационного воздействия, при превышении которого требуется проведение защитных мероприятий с целью ограничения облучения населения. Масштабы и характер мероприятий определяются с учетом интенсивности радиационного воздействия на население по величине ожидаемой коллективной эффективной дозы за 70 лет.

3. Решение о необходимости, а также о характере, объеме и очередности защитных мероприятий принимается органами Госсанэпиднадзора с учетом следующих основных условий:

- местонахождения загрязненных участков (жилая зона: дворовые участки, дороги и подъездные пути, жилые здания, сельскохозяйственные угодья, садовые и приусадебные участки и пр.; промышленная зона:

- территория предприятия, здания промышленного и административного назначения, места для сбора отходов и пр.);

- площади загрязненных участков;
- возможного проведения на участке загрязнения работ, действий (процессов), которые могут привести к увеличению уровней радиационного воздействия на население;
- мощности дозы гамма-излучения, обусловленной радиоактивным загрязнением;
- изменения мощности дозы гамма-излучения на различной глубине от поверхности почвы (при загрязнении территории).

### **Вопросы и задания**

1. Задачи радиационного мониторинга.
2. Какие параметры нормируются при организации радиационного контроля при отводе территорий под строительство.
3. Что такое мощность дозы.
4. Что такое интенсивность эксгаляции.
5. Что такое удельная активность проб.
6. Какие параметры нормируются при организации радиационного контроля жилых и общественных зданий и сооружений.
7. По какому параметру происходит нормирование и организация радиационного контроля радиоактивности строительных материалов.
8. Что такое А эфф.
9. На какие классы подразделяются строительные материалы содержанием ЕРН.
10. В чем заключается ведомственный контроль радиационного качества.
11. Как осуществляется обращение с материалами и изделиями, загрязненными или содержащими радионуклиды.
12. Дайте классификацию жидких и твердых радиоактивных отходов.
13. Критерии вмешательства на загрязненных территориях
14. Критерии вмешательства на территориях, загрязненных в результате радиационных аварий.
15. Критерии вмешательства при обнаружении локальных радиоактивных загрязнений.

Подготовить реферат (приложение 1) и сделать сообщение, решить задачи из приложения 2. Выполнить лабораторную работу (Приложение 4)

### **Список литературы**

1. *Старков В.Д., Мигунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ФГУ ИПП «Тюмень», 2003.-304с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
4. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП2.6.1.2523-09,2009.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99).СП 2.6.1.799-99. Минздрав России, 2000.
7. *Тюменев Р.С., Бадрутдинов О.Р.* Радиоэкологические исследования окружающей среды. Методические указания для практических занятий студентов. Казань,1998.-28с.
8. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационно-экологический мониторинг окружающей среды. Казань: Издательство КГУ, 2009.-40с.

9. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Казань: Издательство КГУ, 2009.-44с.
10. *Сердюкова А.С., Иванова Т.М.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Учебное пособие. М. : МГГА, 2001.-77с.
11. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
12. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
13. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности. МУ 2.6.1.2398-08.
14. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: МУ 2.6.1. 2838-11.

#### **Использованные информационные ресурсы**

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=99696>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116062>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=108075>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991>

<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=78550>

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Старков В.Д., Мизунов В.И.* Радиационная экология. Тюмень: ОАО «Тюменский дом печати», 2007. -400с.
2. *Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н.* Радиоактивность окружающей среды. М.: Бином, 2006.-286с.
3. *Кудряшев Ю.Б.* Радиационная биофизика. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004.-448с.
4. *Руднев А.В.* Радиационная экология. М.:Изд-во МГУ,1990.-88с.
5. *Василенко О.В.* Радиационная экология. М. :Медицина, 2004.-216с.
6. *Пивоваров Ю.П., Михалев В.П.* Радиационная экология. М.:Академия, 2004-240с.
7. *Ярошинская А.А.* Ядерная энциклопедия. М.:Благотворительный фонд Ярошинской, 1996.-656с.
8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП2.6.1.2523-09,2009.
9. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99).СП 2.6.1.799-99. Минздрав России, 2000.
10. *Тюменев Р.С., Бадрутдинов О.Р.* Радиоэкологические исследования окружающей среды. Методические указания для практических занятий студентов. Казань,1998.-28с.
11. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационно-экологический мониторинг окружающей среды. Казань: Издательство КГУ, 2009.-40с.
12. *Бадрутдинов О.Р., Тюменев Р.С.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Казань: Издательство КГУ, 2009.-44с.
13. *Сердюкова А.С., Иванова Т.М.* Радиационная безопасность и дозиметрия. Учебное пособие. М. : МГГА, 2001.-77с.
14. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергетика и биосфера. М. Энергоиздат, 1982.-81 с.
15. *Кривоуцкий Д.А.* Биоиндикация радиоактивных загрязнений. М.: Наука, 1999.-384 с.
16. *Ильенко А.И., Кривоуцкий Д.А.* Радиоэкология. М. Знание, 1971.-41 с.
17. *Кривоуцкий Д.А.* Радиоэкология сообществ наземных животных. М. Энергоатомиздат, 1983.- 96 с.
18. *Кривоуцкий Д.А.* Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз / Кривоуцкий Д. А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И. М. Наука, 1988. -240 с.
19. *Сахаров В.К.* Радиоэкология. СПб.: Издательство «Лань», 2006.-320с.
20. *Сафонова В.Ю., Сафонова В.А.* Радиационная экология. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2005.-312с.
21. *Перцов Л.А.* Природная радиоактивность биосферы. М.:Атомиздат,1964.-315с.
22. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка земельных участков под строительство жилых домов, зданий и сооружений общественного и производственного назначения в части обеспечения радиационной безопасности. МУ 2.6.1.2398-08.
23. Радиационный контроль и санитарно-эпидемиологическая оценка жилых, общественных и производственных зданий и сооружений после окончания их строительства, капитального ремонта, реконструкции по показателям радиационной безопасности: МУ 2.6.1. 2838-11.

**Авария** - нарушение эксплуатации объекта ядерного топливного цикла, при котором произошел выход ядерных материалов, радиоактивных веществ и (или) ионизирующего излучения за предусмотренные проектом объекта ядерного топливного цикла для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы безопасной эксплуатации. Авария характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями.

**Авария радиационная** - потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды.

**Авария радиационная проектная** - авария, для которой проектом определены исходные и конечные состояния радиационной обстановки и предусмотрены системы безопасности.

**Авария ядерная** – авария, произошедшая вследствие неконтролируемой самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления.

**Активность (A)** - мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени:  $A = \frac{dN}{dt}$ , где dN - ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени dt. Единицей активности является беккерель (Бк). Используемая ранее внесистемная единица активности кюри (Ки) составляет  $3,7 \times 10^{10}$  Бк.

**Активность удельная (объемная)** - отношение активности A радионуклида в веществе к массе m (объему V) вещества: Единица удельной активности - беккерель на килограмм, Бк/кг. Единица объемной активности - беккерель на метр кубический, Бк/м³.

$$A_m = \frac{A}{m}, \quad A_v = \frac{A}{V}.$$

**Активность минимально значимая (МЗА)** - активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которой требуется разрешение органов Роспотребнадзора на использование этих источников, если при этом также превышено значение минимально значимой удельной активности.

**Активность эквивалентная равновесная объемная (ЭРОА) дочерних продуктов изотопов радона** -  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  - взвешенная сумма объемных активностей короткоживущих дочерних продуктов изотопа радона -  $^{218}\text{Po}$  (RaA);  $^{214}\text{Pb}$  (RaB);  $^{214}\text{Bi}$

(RaC);  $^{212}\text{Pb}$  (ThB);  $^{212}\text{Bi}$  (ThC) соответственно: (ЭРОА)  $R_n = 0,10 \text{ A RaA} + 0,52 \text{ A RaB} + 0,38 \text{ A RaC}$ .

(ЭРОА)  $\text{Th} = 0,91 \text{ A ThB} + 0,09 \text{ A ThC}$ , где  $A_i$  - объемные активности дочерних продуктов изотопа радона.

**Вещество радиоактивное** - вещество в любом агрегатном состоянии, содержащее радионуклиды с активностью, на которые распространяются требования НРБ-99/2009.

**Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (WR)** - используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов.

**Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (WT)** - множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей в возникновении

**Вмешательство** - действие, направленное на снижение вероятности облучения, либо дозы или неблагоприятных последствий облучения.

**Группа критическая** - группа лиц из населения (не менее 10 человек), однородная по одному или нескольким признакам - полу, возрасту, социальным или профессиональным условиям, месту проживания, рациону питания, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию по данному пути облучения от данного источника излучения.

**Дезактивация** - удаление или снижение радиоактивного загрязнения с какой-либо поверхности или из какой-либо среды.

**Доза поглощенная (D)** - величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = \frac{de}{dm} \quad , \quad \text{где } de - \text{средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объеме, а } dm - \text{масса вещества в этом объеме.}$$

Энергия может быть усреднена по любому определенному объему, и в этом случае средняя доза будет равна полной энергии, переданной объему, деленной на массу этого объема. В единицах СИ поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж/кг), и имеет специальное название - грей (Гр). Используемая ранее внесистемная единица рад равна 0,01 Гр.

**Доза в органе или ткани (DT)** - средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела.

**Доза эффективная (E)** - величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности. Она представляет собой сумму произведений

эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты. Единица эффективной дозы - зиверт (Зв).

**Доза эквивалентная (H<sub>T,R</sub>)** - поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент(см.выше) для данного вида излучения, W<sub>R</sub>:

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}$$

где D<sub>T,r</sub> - средняя поглощенная доза в органе или ткани T, а W<sub>r</sub> - взвешивающий коэффициент для излучения r.

При воздействии различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения.

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

Единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

**Доза эффективная (эквивалентная) годовая** - сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной (эквивалентной) дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год.

**Доза эффективная коллективная** - мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения; она равна сумме индивидуальных эффективных доз. Единица эффективной коллективной дозы - человеко-зиверт (чел-Зв).

**Доза предотвращаемая** - прогнозируемая доза вследствие радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.

**Загрязнение радиоактивное** - присутствие радиоактивных веществ на поверхности, внутри материала, в воздухе, в теле человека или воздействие по данному пути облучения от данного источника излучения.

**Загрязнение поверхности неснимаемое (фиксированное)** - радиоактивные вещества, которые не переносятся при контакте на другие предметы и не удаляются при дезактивации.

**Загрязнение поверхности снимаемое (нефиксированное)** - радиоактивные вещества, которые переносятся при контакте на другие предметы и удаляются при дезактивации.

**Захоронение радиоактивных отходов** - размещение радиоактивных отходов в хранилище без намерения последующего их извлечения.

**Зона наблюдения** - территория за пределами санитарно-защитной зоны, на которой проводится радиационный контроль.

**Зона радиационной аварии** - территория, на которой установлен факт радиационной аварии.



**Источник ионизирующего излучения** - (в рамках данного документа - источник излучения) - радиоактивное вещество или устройство, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение, на которое распространяется действие НРБ-99.

**Источник излучения закрытый** - источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

**Источник излучения открытый** - источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду.

**Источник излучения природный** - источник ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие НРБ-99.

**Источник излучения техногенный** - источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности.

**Квота** - часть предела дозы, установленная для ограничения облучения населения от конкретного техногенного источника излучения и пути облучения (внешнее, поступление с водой, пищей и воздухом).

**Контроль радиационный** - получение информации о радиационной обстановке в организации, в окружающей среде и об уровнях облучения людей (включает в себя дозиметрический и радиометрический контроль).

**Культура безопасности** - квалификационная и психологическая подготовленность всех лиц, при которой обеспечение безопасности объекта ядерного топливного цикла является приоритетной целью и внутренней потребностью, приводящей к осознанию личной ответственности и к самоконтролю при выполнении всех работ, влияющих на безопасность.

**Место рабочее** - место постоянного или временного пребывания персонала для выполнения производственных функций в условиях воздействия ионизирующего излучения в течение более половины рабочего времени или двух часов непрерывно.

**Мощность дозы** - доза излучения за единицу времени (секунду, минуту, час).

**Облучение** - воздействие на человека ионизирующего излучения.

**Облучение природное** - облучение, которое обусловлено природными источниками излучения.

**Облучение производственное** - облучение работников от всех техногенных и природных источников ионизирующего излучения в процессе производственной деятельности.

**Облучение планируемое повышенное** - планируемое облучение персонала в дозах, превышающих установленные основные пределы доз, с целью предупреждения развития радиационной аварии или ограничения ее последствий.

**Облучение потенциальное** - облучение, которое может возникнуть в результате радиационной аварии.

**Облучение профессиональное** - облучение персонала в процессе его работы с техногенными источниками ионизирующего излучения.

**Облучение техногенное** - облучение от техногенных источников, как в нормальных, так и в аварийных условиях, за исключением медицинского облучения пациентов.

**Обращение с радиоактивными отходами** - все виды деятельности в области использования атомной энергии, связанной со сбором, с транспортированием, переработкой, хранением и (или) захоронением радиоактивных отходов, проектированием (конструированием), размещением, сооружением, вводом в эксплуатацию, выводом из эксплуатации и закрытием объектов по обращению с радиоактивными отходами; **Объекты по обращению с радиоактивными отходами** - установки, системы, оборудование, сооружения, производства, хранилища и иные объекты, на которых осуществляется обращение с радиоактивными отходами;

**Объект радиационный** - организация, где осуществляется обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения.

**Органы государственного надзора за радиационной безопасностью** - органы, которые уполномочены Правительством Российской Федерации или ее субъектов осуществлять надзор за радиационной безопасностью.

**Отработавшее ядерное топливо** - облученное ядерное топливо, дальнейшее использование которого в ядерном реакторе не предусматривается;

**Отходы радиоактивные** - не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные НРБ-99 и настоящими Правилами.

**Паспорт радиационно-гигиенический организации** - документ, характеризующий состояние радиационной безопасности в организации и содержащий рекомендации по ее улучшению.

**Паспорт радиационно-гигиенический территории** - документ, характеризующий состояние радиационной безопасности населения территории и содержащий рекомендации по ее улучшению.

**Персонал** - лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

**Переработка радиоактивных отходов** - технологические операции, направленные на изменение агрегатного состояния и (или) физико-химических свойств радиоактивных отходов и осуществляемые для перевода их в формы, приемлемые для транспортирования, хранения и (или) захоронения.

**Предел дозы (ПД)** - величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

**Предел годового поступления (ПГП)** - допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы.

**Пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилища радиоактивных отходов** - не относящиеся к ядерным установкам(см. ниже) и радиационным источникам стационарные объекты и сооружения, предназначенные для хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранения или захоронения радиоактивных отходов;

**Работа с источником ионизирующего излучения** - все виды обращения с источником излучения на рабочем месте, включая радиационный контроль.

**Работа с радиоактивными веществами** - все виды обращения с радиоактивными веществами на рабочем месте, включая радиационный контроль.

**Радиационная авария** - потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм или радио- активному загрязнению окружающей среды.

**Радиационные источники** - не относящиеся к ядерным установкам комплексы, установки, аппараты, оборудование и изделия, в которых содержатся радиоактивные вещества или генерируется ионизирующее излучение.

**Радиационная безопасность населения** - состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

**Радиоактивные вещества** - не относящиеся к ядерным материалам вещества, испускающие ионизирующее излучение;

**Радиоактивные отходы** - ядерные материалы и радиоактивные вещества, дальнейшее использование которых не предусматривается.

К *жидким радиоактивным отходам* относятся не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы, в которых удельная активность радионуклидов более чем в 10 раз превышает значения уровней вмешательства при поступлении с водой, установленные действующими "Основными

санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)" , и "Нормами радиационной безопасности" (НРБ-99/2009)"

К *твердым радиоактивным отходам* относятся отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные жидкие радиоактивные отходы, в которых удельная активность радионуклидов больше значений, установленных действующими "Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)" , и "Нормами радиационной безопасности" (НРБ-99/2009)", а при неизвестном радионуклидном составе удельная активность больше:

-	100	кБк/кг	-	для	источников	бета-излучения;
-	10	кБк/кг	-	для	источников	альфа-излучения;
-	1,0	кБк/кг	-	для	трансурановых	радионуклидов.

К *газообразным радиоактивным отходам* относятся не подлежащие использованию радиоактивные газы и аэрозоли, образующиеся при производственных процессах с объемной активностью, превышающей допустимую объемную активность, установленную действующими "Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99)" , и "Нормами радиационной безопасности" (НРБ-99/2009)"

Радиоактивные отходы подразделяются по удельной активности на 3 категории – низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные.

**Радионуклид** - радиоактивные атомы данного химического элемента.

**Радионуклидный источник** - вещество, содержащее радионуклид (смесь радионуклидов), заключенное в оболочку либо другим способом зафиксированное в объеме какого-либо материала или на его поверхности и используемое в качестве источника ионизирующего излучения.

**Риск радиационный** - вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения.

**Санитарно-защитная зона** - территория вокруг источника ионизирующего излучения, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации данного источника может превысить установленный предел дозы облучения населения.

**Сбор радиоактивных отходов** - сосредоточение радиоактивных отходов в специально отведенных и оборудованных местах;

**Специализированная организация по обращению с радиоактивными отходами** - эксплуатирующая организация, осуществляющая обращение с радиоактивными отходами и иные виды деятельности в области использования атомной энергии, не связанные непосредственно с эксплуатацией ядерных установок и радиационных источников, кроме тех случаев, когда использование ядерных установок и радиационных источников необходимо для обращения с радиоактивными отходами;

**Средство индивидуальной защиты** - средство защиты персонала от внешнего облучения, поступления радиоактивных веществ внутрь организма и радиоактивного загрязнения кожных покровов.

**Транспортирование радиоактивных отходов** - перемещение радиоактивных отходов с применением транспортных и грузоподъемных средств;

**Уровень вмешательства (УВ)** - уровень радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия.

**Уровень контрольный** - значение контролируемой величины дозы, мощности дозы, радиоактивного загрязнения и т.д., устанавливаемое для оперативного радиационного контроля с целью закрепления достигнутого уровня радиационной безопасности, обеспечения дальнейшего снижения облучения персонала и населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды.

**Устройство (источник), генерирующее ионизирующее излучение**, - электрофизическое устройство (рентгеновский аппарат, ускоритель, генератор и т.д.), в котором ионизирующее излучение возникает за счет изменения скорости заряженных частиц, их аннигиляции или ядерных реакций.

**Физический барьер** – преграда на пути распространения ионизирующего излучения, ядерного материала, радиоактивного вещества.

**Физическая защита объекта ядерного топливного цикла** - технические и организационные меры по обеспечению сохранности содержащихся на объекте ядерных материалов, радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, предотвращению несанкционированного проникновения на территорию объекта ядерного топливного цикла, предотвращению несанкционированного доступа к ядерным материалам и радиоактивным веществам, своевременному обнаружению и пресечению диверсионных и террористических актов, угрожающих безопасности объекта ядерного топливного цикла.

**Хранение радиоактивных отходов** - размещение радиоактивных отходов в хранилище с намерением последующего их извлечения;

**Хранилище радиоактивных отходов** - стационарный объект или стационарное сооружение, предназначенные для хранения или захоронения радиоактивных отходов;

**Эффекты излучения детерминированные** - клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше - тяжесть эффекта зависит от дозы.

**Эффекты излучения стохастические** - вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность возникновения которых пропорциональна дозе и для которых тяжесть проявления не зависит от дозы.

**Ядерные материалы** - материалы, содержащие или способные воспроизвести делящиеся (расщепляющиеся) ядерные вещества;

**Ядерные установки** - сооружения, комплексы с ядерными материалами, предназначенные для производства, переработки, транспортирования ядерного топлива и ядерных материалов, включая добычу урановых руд, гидрометаллургическую переработку, аффинаж, сублиматное и металлургическое производство, разделение изотопов урана, производство энергии, радиохимическую переработку ядерного топлива, а также для обращения с образующимися при этом радиоактивными отходами.

**ТЕМЫ ДЛЯ РЕФЕРАТОВ**

1. Действие радиации на живые организмы.
2. Экологические проблемы, связанные с добычей урановой руды, обогащением урана и производством ядерного топлива
3. Физические основы, системы и типы ядерных реакторов.
4. Отработанное ядерное топливо: масштабы и проблемы.
5. Биоиндикация радиоактивных загрязнений.
6. Транспортировка ядерных материалов.
7. Радиоактивные отходы: определение и классификация.
8. Возможности метода меченых атомов.
9. Экологические проблемы, связанные с радиоактивным йодом.
10. Радиационные проблемы, связанные с добычей полезных ископаемых.
- 1 1. Высокообогащенный уран.
12. Экологические проблемы, связанные с плутонием.
13. Экологические проблемы, связанные со стронцием.
14. Экологические проблемы, связанные с цезием.
15. Экологические проблемы, связанные с тритием.
16. Ядерное оружие: типы, физика, поражающие факторы, экологические проблемы.
17. Воздействие ядерного излучения радона и его дочерних продуктов распада на население.
18. Ядерный потенциал в странах мира.
19. Ядерные полигоны планеты.
20. Ядерная зима.
21. Сброс радиоактивных отходов в моря.
22. Система международных договоров об ограничении ядерных вооружений.
23. Атомные электростанции в странах мира.
24. Подземные ядерные взрывы в мирных целях.
25. Радионуклиды и их применение в народном хозяйстве.
26. Международная шкала ядерных событий.
27. Радиационные инциденты на Южном Урале.
28. Восточноуральский радиоактивный след.
29. Радиационные инциденты в Уиндскейл (Великобритания).
30. Радиационные инциденты в Томске 7 (Россия).
- 3 1. Радиационные инциденты в Три-Майл-Айленде (США).
32. Чернобыль: причины, оценки, последствия.
33. Международные и национальные организации в области использования ядерной энергии
34. Переработка отработанного ядерного топлива.
35. Международная комиссия по радиационной защите.(МКРЗ)
36. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ)

## ЗАДАЧИ

Примеры решения задач приведены в Методических пособиях(1-3)  
БИЛЕТ №1

**Задача 1.** Мясо говядины загрязнено калием -42 в количестве 3700 Бк/кг. Вычислить какова степень загрязнения мяса будет через 10 дней.

**Задача 2.** Рассчитайте эквивалентную дозу в легких, получаемую в течение года персоналом (группа А) при вдыхании воздуха, содержащего радон-220 (торон), очищенный от ДПР, если его объемная активность равна  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Поглощаемая легкими скрытая энергия  $\alpha$ -излучения радона-220 составляет 20,9 МэВ/расп.ат.<sup>-1</sup>.

**Задача 3.** Для лиц из взрослого населения, проживающих в условиях, когда ОА  $^{14}_6\text{C}$  в воздухе составляет  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , рассчитайте допустимое поступление  $^{22}\text{Na}$ , содержащегося в воде, если предел его годового поступления равен  $6,7 \cdot 10^4 \text{ Бк} \cdot \text{год}^{-1}$ . Дозовый коэффициент для углерода-14  $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$  равен  $2,5 \cdot 10^{-9} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ .

## БИЛЕТ №2

**Задача 1.** Молоко загрязнено кальцием-45 в количестве 200Бк /кг. Вычислить каково будет загрязнение молока через один месяц.

**Задача 2.** Рассчитайте эквивалентную дозу в легких и эффективную дозу, получаемые за счет радона-222 без ДПР за год лицами из населения за время нахождения в жилом помещении, где ОА радона-222 составляет  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ . 20%времени население проводит вне помещения, 80% - в помещении.

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте суммарную эффективную дозу, получаемую в производственных условиях и обусловленную: 1) поступлением в организм  $^{36}_{17}\text{Cl}$ , ОА которого в воздухе рабочих помещений составляет  $24 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ , 2) воздействием  $\gamma$ -излучения со средней энергией  $0,9 \text{ МэВ} \cdot \text{жв.}^{-1}$  в ИЗО-геометрии при мощности экспозиционной дозы  $180 \text{ пА} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Дозовый коэффициент для хлора  $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$  равен  $3,4 \cdot 10^{-10} \text{ Зв} \cdot \text{Бк}^{-1}$ , коэффициент передачи энергии в воздухе -  $0,0284 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ , массовый коэффициент для ткани –  $0,0313 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ .

## БИЛЕТ №3

**Задача 1.** Мясо говядины загрязнено калием -42 в количестве 3700 КБк/кг. Вычислить какова степень загрязнения мяса будет через 25 часов.

**Задача 2.** Рассчитайте эквивалентную дозу в легких и эффективную дозу для персонала (группа А), получаемые за счет ДПР радона-222, ОА которых в воздухе рабочих помещений при наличии радиоактивного равновесия с радоном-222 составляет  $100 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ . Коэффициент задержки короткоживущих ДПР радона-222 в легких  $K = 0,5$ . Скрытая энергия  $\alpha$ -излучения ДПР радона-222 составляет  $3,46 \cdot 10^4 \text{ МэВ} \cdot \text{Бк}^{-1}$

**Задача 3.** Для лиц из персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу на  $\gamma$ -квант для  $\gamma$ -излучения с энергией  $10 \text{ МэВ} \cdot \text{жв.}^{-1}$  при облучении кожи, если массовый коэффициент передачи энергии ткани составляет  $0,0327 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ . Рассчитайте среднегодовую



допустимую плотность потока (ДПП). Основной дозовый предел (ОДП) эквивалентной дозы для кожи – 500 мЗв за год.

#### БИЛЕТ №4

**Задача 1.** Мясо говядины загрязнено калием -42 в количестве 3700 Бк/кг. Вычислить какова степень загрязнения мяса будет через 50 часов.

**Задача 2.** Рассчитайте для персонала (группа А) эффективную дозу, получаемую за счет ДПР радона-222, находящихся в равновесии с материнским нуклидом, ОА которого равна 4000 Бк·м<sup>-3</sup>.

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную дозу, приходящуюся на частицу, для моноэнергетических нейтронов с энергиями 0,001 МэВ·част.<sup>-1</sup>, если массовые коэффициенты передачи энергии биологической ткани составляют соответственно 7,55 см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>.

Взвешивающий коэффициент  $W_R$  равен: 5. ИЗО-поле.

#### БИЛЕТ №5

**Задача 1.** Определить экспозиционную дозу в единицах СИ, если поглощенная доза равна 13Мрад.

**Задача 2.** Рассчитайте эффективную дозу для персонала (группа А), создаваемую  $\alpha$ -излучением ДПР радона-220 (Зв·год<sup>-1</sup>), если их ЭРОА составляет 100 Бк·м<sup>-3</sup>. Рассчитайте ДОА ДПР радона-220.

Коэффициент задержки ДПР радона-220 в легких – 0,5. Скрытая энергия  $\alpha$ -излучения ДПР радона-220 составляет 1,59·10<sup>5</sup> МэВ·Бк<sup>-1</sup>

**Задача 3.** Для лиц из персонала (группа А) рассчитайте эффективные годовые дозы и среднегодовые ДПП в ИЗО- и ПЗ-геометриях для следующих энергий нейтронов: 1) тепловые, если плотности потоков нейтронов составляют соответственно: 1) ИЗО – 99 част·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, ПЗ - 43 част·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, Эффективные дозы на частицу соответственно равны: 1) 3,30·10<sup>-12</sup> Зв·см<sup>2</sup>·част.<sup>-1</sup>, ПЗ-поле: 1) 7,6·10<sup>-12</sup>;

#### БИЛЕТ №6

**Задача 1.** Мясо говядины загрязнено калием -42 в количестве 3700 Бк/кг. Вычислить какова степень загрязнения мяса будет через 5 дней.

**Задача 2.** Рассчитайте эффективную дозу (Зв·год<sup>-1</sup>) для населения, создаваемую  $\alpha$ -излучением ДПР радона-222, содержащихся в воздухе жилых помещений, если ОА радона-222 при его равновесии с ДПР составляет 100 Бк·м<sup>-3</sup>. 20% времени население проводит вне помещения, 80% - в помещении.

**Задача 3.** Для лиц из персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу за год для средней энергии спектра  $\beta$ -излучения 0,7 МэВ·част.<sup>-1</sup>, получаемую при контактном облучении кожи, если плотность потока  $\beta$ -излучения равна 600 част·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Определите среднегодовую ДПП  $\beta$ -излучения. Эквивалентная доза в коже, приходящаяся на частицу, – 4,8·10<sup>-10</sup> Зв·см<sup>2</sup>·част.<sup>-1</sup>.

#### БИЛЕТ №7

**Задача 1.** Определить экспозиционную дозу в единицах СИ, если поглощенная доза равна 13мрад.

**Задача 2.** Рассчитайте эффективную дозу для взрослого населения, получаемую в жилых помещениях, если ОА ДПР радона-222, находящихся в равновесии с радоном, равна

80 Бк·м<sup>-3</sup>, а ЭРОА торона – 20 Бк·м<sup>-3</sup>. 20% времени население проводит вне помещения, 80% – в помещении.

**Задача 3.** Для взрослого населения рассчитайте эффективную дозу, полученную за год от  $\gamma$ -излучения со средней энергией 0,3 МэВ  $\gamma$ -кв.<sup>-1</sup> в ИЗО геометрии, если плотность потока излучения в помещении – 100  $\gamma$ -кв.<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, а во внешней среде – 500  $\gamma$ -кв.<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Время облучения  $t$  для населения составляет 8800 ч·год<sup>-1</sup>. 20 % всего времени население проводит вне помещений, 80 % – в помещениях.

Для ИЗО-геометрии  $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{kt} = 0,019 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ .

#### БИЛЕТ №8

**Задача 1.** Молоко загрязнено кальцием-45 в количестве 400 Бк /кг. Вычислить каково будет загрязнение молока через два месяца.

**Задача 2.** Рассчитайте для персонала (группа А) эквивалентную дозу в легких и эффективную дозу (мЗв·год<sup>-1</sup>), создаваемые природными соединениями тория-232, содержащимися в воздухе производственных помещений в виде аэрозольных частиц, если торий-232 находится в равновесии со всеми ДПР, а его ОА составляет 0,1 Бк·м<sup>-3</sup>. Суммарная энергия  $\alpha$ -излучения тория и его ДПР равна 30 МэВ·расп.ат.<sup>-1</sup>, коэффициент задержки аэрозольных частиц в легких – 0,125, эффективный период полувыведения РН – 1460 сут.

**Задача 3.** Для лиц из персонала (группа А) определите эффективную дозу за год, получаемую за счет  $\gamma$ -излучения со средней энергией 0,3 МэВ  $\gamma$ -кв.<sup>-1</sup> в ИЗО-геометрии, если мощность экспозиционной дозы в производственных условиях равна 1070 пА·кг<sup>-1</sup>, коэффициент передачи энергии воздушной среде – 0,0289 см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>, массовый коэффициент передачи энергии биологической ткани – 0,019 см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>. Энергия, передаваемая  $\gamma$ -излучением воздушной среде, – 3,4·10<sup>-7</sup> эрг·г<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> на 1 пА·кг<sup>-1</sup>.

#### БИЛЕТ №9

**Задача 1.** Мясо говядины загрязнено калием -42 в количестве 3700 Бк/кг. Вычислить какова степень загрязнения мяса будет через 50 часов.

**Задача 2.** Рассчитайте для персонала (группа А) эквивалентную дозу в легких и эффективную дозу (мЗв·год<sup>-1</sup>), создаваемые природными соединениями тория-232, содержащимися в воздухе производственных помещений в виде аэрозольных частиц, если торий-232 находится в равновесии со всеми ДПР, а его ОА составляет 1 Бк·м<sup>-3</sup>. Суммарная энергия  $\alpha$ -излучения тория и его ДПР равна 30 МэВ·расп.ат.<sup>-1</sup>, коэффициент задержки аэрозольных частиц в легких – 0,125, эффективный период полувыведения РН – 1460 сут. Рассчитайте ПГП и ДОА тория-232 для персонала (группа А).

**Задача 3.** Для лиц из персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу на частицу для средних энергий спектра  $\beta$ -излучения 0,7 МэВ·част.<sup>-1</sup> при контактном облучении кожи, если массовый коэффициент передачи энергии биологической ткани составляет соответственно 4,29 см<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>. Определите среднегодовую ДПП  $\beta$ -излучения. Предел дозы облучения персонала  $\beta$ -излучением  $H_K = 500 \text{ мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$  (кожа).

### БИЛЕТ №10

**Задача 1.** Вычислить поглощенную дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при  $0^{\circ}\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении в куб.см воздуха образуется  $2,8 \times 10^{12}$  пар ионов.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу в легких и эффективную дозу, получаемые за счет нерастворимого радия-226, который содержится в помещении в виде аэрозольных частиц, и концентрация (ОА) которого равна  $1 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Эффективный период полувыведения радия-226 – 120 сут, коэффициент задержки – 0,125.

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную дозу, создаваемую  $\gamma$ -излучением со средней энергией  $2,0 \text{ МэВ}\cdot\gamma\cdot\text{кв.}^{-1}$ , если плотность потока излучения в рабочих условиях при геометрии параллельного пучка (ПЗ) составляет  $5100 \gamma\cdot\text{кв.}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Для такой же плотности потока излучения рассчитайте эффективную дозу при ИЗО-геометрии. Для двух этих случаев найдите ДПП  $\gamma$ -излучения.

$$\text{Для ПЗ-геометрии } \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{кт}} - 0,0234 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}, \text{ для ИЗО-геометрии - } 0,0185 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}.$$

### БИЛЕТ №11

**Задача 1.** Вычислить поглощенную дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при  $0^{\circ}\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении в куб.см воздуха образуется  $5,6 \times 10^{12}$  пар ионов.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу в легких и эффективную дозу ( $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ ) при условиях, когда природный уран ( $^{238}\text{U}$  равновесный с  $^{234}\text{U}$ ) содержится в воздухе производственных помещений в виде пыли с концентрацией  $10 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ . Содержание урана в пыли – 0,36 %, эффективный период полувыведения РН – 0,329 год $^{-1}$ . Суммарная энергия  $\alpha$ -излучения урана ( $^{238}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ ) равна  $9,2 \text{ МэВ}\cdot\text{расп.ат.}^{-1}$ , коэффициент задержки аэрозольных частиц в легких – 0,125. Активность урана  $A_U$  –  $124 \text{ Бк}\cdot\text{мг}^{-1}$ .

**Задача 3.** Для взрослого населения рассчитайте эффективную дозу, полученную за год от  $\gamma$ -излучения со средней энергией  $0,3 \text{ МэВ}\cdot\gamma\cdot\text{кв.}^{-1}$  в ИЗО геометрии, если плотность потока излучения в помещении –  $100 \gamma\cdot\text{кв.}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , а во внешней среде –  $50 \gamma\cdot\text{кв.}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . 20 % всего времени население проводит вне помещений, 80 % – в помещениях.

$$\text{Для ИЗО-геометрии } \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{кт}} - 0,019 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}.$$

### БИЛЕТ №12

**Задача 1.** Молоко загрязнено кальцием-45 в количестве  $400 \text{ Бк} / \text{кг}$ . Вычислить каково будет загрязнение молока через один месяц.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу ( $\text{мЗв}\cdot\text{год}^{-1}$ ) в желудке (включая тонкую кишку) и в верхнем и нижнем отделах толстого кишечника (ВТК и НТК, соответственно) и эффективную дозу, полученные при воздействии  $\alpha$ -излучения природного равновесного нерастворимого урана-238 (коэффициент эманирования – менее 5 %, т. е. пренебрежимо мал), поступающего в организм через легкие с воздухом рабочих помещений, если его ОА составляет  $10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Масса  $m$  желудка – 1350 г. Время нахождения  $\tau$  РН в желудке – 5 ч. Масса кишечника: ВТК – 210 г, НТК – 160 г. Время нахождения РН в ВТК – 8 ч, НТК – 18 ч. Коэффициент выведения  $f_{возд}$  из легких  $^{238}\text{U}$  - 0,625. Суммарная энергия  $\alpha$ -излучения  $^{238}\text{U}$  равна 43,4 МэВ/расп.ат. $^{-1}$ .

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную годовую дозу, полученную при воздействии в ИЗО-геометрии  $\gamma$ -излучения со средней энергией 0,8 МэВ  $\gamma$ -кв. $^{-1}$ , если мощность экспозиционной дозы в производственных условиях составляет 150 мкР·ч $^{-1}$ , коэффициент передачи энергии воздушной среде – 0,0289 см $^2$ ·г $^{-1}$ , массовый коэффициент передачи энергии биологической ткани – 0,020 см $^2$ ·г $^{-1}$ . 1 мкР·ч $^{-1}$  соответствует передаваемой воздуху энергии  $\gamma$ -излучения 2,44·10 $^{-8}$  эрг·г $^{-1}$ ·с $^{-1}$ .

#### БИЛЕТ №13

**Задача 1.** Вычислить поглощенную дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при 0 $^{\circ}$ С и нормальном атмосферном давлении в куб.см воздуха образуется 1,4 x 10 $^{12}$  пар ионов.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте дозовый коэффициент для урана-238 (нерастворимого), содержащегося в воздухе производственных помещений в виде пыли и поступающего в организм через органы дыхания, если его активность составляет 1 Бк·м $^{-3}$ .

Энергия  $\alpha$ -излучения U-238 – 4,16 МэВ/расп.ат. $^{-1}$ .  $T_{эфф}$  - 120 сут. Коэффициент задержки  $f_{возд}$  - 0,125. Масса легких  $m_{л}$  - 1000 г.

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте эквивалентную дозу (мЗв/год $^{-1}$ ) в желудке (включая тонкую кишку) и в верхнем и нижнем отделах толстого кишечника (ВТК и НТК, соответственно) и эффективную дозу, полученные при воздействии  $\alpha$ -излучения природного равновесного нерастворимого урана-238 (коэффициент эманирования – менее 5 %, т. е. пренебрежимо мал), поступающего в организм через легкие с воздухом рабочих помещений, если его ОА составляет 1 Бк·м $^{-3}$ .

Масса  $m$  желудка – 1350 г. Время нахождения  $\tau$  РН в желудке – 5 ч. Масса кишечника: ВТК – 210 г, НТК – 160 г. Время нахождения РН в ВТК – 8 ч, НТК – 18 ч. Коэффициент выведения  $f_{возд}$  из легких  $^{238}\text{U}$  - 0,625. Суммарная энергия  $\alpha$ -излучения  $^{238}\text{U}$  равна 43,4 МэВ/расп.ат. $^{-1}$ .

#### БИЛЕТ №14

**Задача 1.** Молоко загрязнено кальцием-45 в количестве 200Бк /кг. Вычислить каково будет загрязнение молока через 126 суток.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте дозовый коэффициент для радия-226, находящегося в воздухе производственных помещений в виде аэрозольных частиц и поступающего в организм через органы дыхания, если его активность равна 1 Бк·м $^{-3}$ .

Коэффициент задержки  $f_{возд}$  - 0,125. Масса легких  $m_{л}$  - 1000 г. Энергия  $\alpha$ -излучения Ra-226 – 4,8 МэВ/расп.ат. $^{-1}$ .  $T_{эфф}$  - 120 сут.

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную годовую дозу, полученную при воздействии в ИЗО-геометрии  $\gamma$ -излучения со средней энергией 0,8 МэВ  $\gamma$ -кв. $^{-1}$ , если мощность экспозиционной дозы в производственных условиях составляет 150 мкР·ч $^{-1}$ , коэффициент передачи энергии воздушной среде – 0,0289 см $^2$ ·г $^{-1}$ , массовый коэффициент передачи энергии биологической ткани – 0,020 см $^2$ ·г $^{-1}$ . 1 мкР·ч $^{-1}$  соответствует передаваемой воздуху энергии  $\gamma$ -излучения 2,44·10 $^{-8}$  эрг·г $^{-1}$ ·с $^{-1}$ .

### БИЛЕТ №15

**Задача 1.** Вычислить поглощенную дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при  $0^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении в куб.см воздуха образуется  $1,8 \times 10^{12}$  пар ионов.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте дозовый коэффициент для калия-40 ( $\beta$ - и  $\gamma$ -излучатель), содержащегося в воздухе производственных помещений в виде аэрозолей и поступающего в организм через легкие, если его объемная активность составляет  $100 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ,  $\lambda_{эфф} - 26 \text{ год}^{-1}$ . Суммарная энергия  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения калия-40 –  $0,75 \text{ МэВ}\cdot\text{расп.ат.}^{-1}$ .

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте суммарную эффективную дозу, получаемую в производственных условиях и обусловленную: 1) поступлением в организм  $^{36}_{17}\text{Cl}$ , ОА которого в воздухе рабочих помещений составляет  $24 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , 2) воздействием  $\gamma$ -излучения со средней энергией  $0,9 \text{ МэВ}\cdot\text{жв.}^{-1}$  в ИЗО-геометрии при мощности экспозиционной дозы  $180 \text{ пА}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Дозовый коэффициент для хлора  $\varepsilon_{перс}^{возд}$  равен  $3,4 \cdot 10^{-10} \text{ Зв}\cdot\text{Бк}^{-1}$ , коэффициент передачи энергии в воздухе –  $0,0284 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ , массовый коэффициент для ткани –  $0,0313 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ .

### БИЛЕТ №16

**Задача 1.** Молоко загрязнено кальцием-45 в количестве  $500 \text{ Бк} / \text{кг}$ . Вычислить каково будет загрязнение молока через два месяца.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную дозу, полученную за счет  $^{31}_{14}\text{Si}$  (Б), а также ДОА ( $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ) и ПГП ( $\text{Бк}\cdot\text{год}^{-1}$ ), при условии, что измеренная ОА в воздухе производственных помещений равна  $3 \times 10^2 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Соответствующий дозовый коэффициент –  $2,9 \cdot 10^{-11} \text{ Зв}\cdot\text{Бк}^{-1}$ .

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную дозу, приходящуюся на частицу, для моноэнергетических нейтронов с энергиями 1)  $20 \text{ МэВ}\cdot\text{част.}^{-1}$ , если массовый коэффициент передачи энергии биологической ткани составляет  $0,01072 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ . Взвешивающий коэффициент  $W_R$  равен 10. ИЗО-поле.

### БИЛЕТ №17

**Задача 1.** Вычислить поглощенную дозу в единицах СИ, если при облучении животного гамма-лучами при  $0^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении в куб.см воздуха образуется  $1 \times 10^{12}$  пар ионов.

**Задача 2.** Для персонала (группа А) рассчитайте эффективную дозу, получаемую за счет  $^{232}_{90}\text{Th}$  (П), природного, находящегося в равновесии с ДПР, а также ДОА ( $\text{Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ ) и ПГП ( $\text{Бк}\cdot\text{год}^{-1}$ ), если измеренная ОА в воздухе производственных помещений равна  $10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ . Дозовый коэффициент для тория –  $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ Зв}\cdot\text{Бк}^{-1}$ .

**Задача 3.** Для персонала (группа А) рассчитайте суммарную эффективную дозу, получаемую в производственных условиях и обусловленную: 1) поступлением в организм  $^{36}_{17}\text{Cl}$ , ОА которого в воздухе рабочих помещений составляет  $240 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$ , 2) воздействием  $\gamma$ -излучения со средней энергией  $0,9 \text{ МэВ}\cdot\text{жв.}^{-1}$  в ИЗО-геометрии при мощности экспозиционной дозы  $1,8 \text{ пА}\cdot\text{кг}^{-1}$ . Дозовый коэффициент для хлора  $\varepsilon_{перс}^{возд}$  равен  $3,4 \cdot 10^{-10} \text{ Зв}\cdot\text{Бк}^{-1}$ , коэффициент передачи энергии в воздухе –  $0,0284 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ , массовый коэффициент для ткани –  $0,0313 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$ .

## ПРИМЕРНЫЕ ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Каково строение атома и ядра атома.
2. Что такое ядерные силы, дефект массы.
3. Что такое  $\alpha$ ,  $\beta$  – распад.
4. Что такое внутренняя конверсия.
5. Каков механизм взаимодействия радиоактивных излучений с веществом.
6. Какие особенности взаимодействия нейтронов с веществом. Типы нейтронов.
7. Какие виды ионизирующих излучений Вы знаете.
8. Какая проникающая способность у  $\gamma$  - излучения.
9. Каков механизм передачи энергии заряженных частиц.
10. Что такое линейная передача энергии (ЛПЭ).
11. Что такое Кривая Брегга.
12. Редко и плотно ионизирующее излучение.
13. Какие единицы измерения радиоактивности Вы знаете и какова их взаимосвязь.
14. Какие методы обнаружения и регистрации ионизирующего излучения Вы знаете.
15. Из чего складывается радиационный фон Земли и какие его компоненты.
16. Какова связь между первичными и вторичными космическими излучениями.
17. Из чего складывается природная радиоактивность.
18. Какие основные радиоактивные семейства Вы знаете.
19. Что такое радиоактивность?
20. Каких нуклидов больше-стабильных или радиоактивных
21. Что такое радиоактивные ряды? Приведите примеры.
22. Существуют ли радиоактивные элементы, не входящие в ряды?
23. Что такое нуклон
24. Как схематически обозначают тип атомного ядра?
25. Что такое изотопы, изомеры, изобары?
26. Что такое нуклиды?
27. Что представляют собой альфа-излучение, бета-излучение, гамма-излучение?
28. Какую роль в бета-превращениях играет нейтрино?
29. Что такое ядерная реакция?
30. Что такое активность радионуклида?
31. Назовите единицы радиоактивности и связь между ними.
32. Дайте определение основному закону радиоактивного распада.
33. Что такое период полураспада?
34. Какая существует связь между активностью и массой радионуклида? Напишите формулу.
35. Для чего введено понятие дозы излучения?
36. Что такое экспозиционная доза излучения?
37. Что такое поглощенная доза излучения?
38. Что такое эквивалентная доза излучения?
39. Что такое эффективная доза излучения?
40. Какова связь между единицей измерения рад и грей?
41. Что такое взвешивающие коэффициенты и для чего они нужны?
42. Что такое предел дозы?
43. Назовите единицы измерения в системе СИ основных доз излучения.
44. Назовите основные дозообразующие радионуклиды.
45. Как рассчитываются коэффициенты накопления (КН) радионуклидов?

46. Какие факторы влияют на величину коэффициента перехода радионуклида в растения?
47. Что такое ППП?
48. Что такое ДОО?
49. Какие виды ионизирующих излучений Вы Знаете?
50. На какие процессы тратят энергию при взаимодействии с веществом заряженные частицы?
51. На какие процессы тратят энергию при взаимодействии с веществом гамма-кванты?
52. Опишите закон ослабления интенсивности гамма-излучения в веществе.
53. Что такое кратность ослабления интенсивности гамма-излучения в веществе?
54. Как линейный коэффициент ослабления связан с массовым коэффициентом?
55. Назовите категории облучаемых лиц в соответствии с НРБ-99/2009.
56. Что такое предел дозы (ПД)?
57. Что представляет собой радон?
58. Какой вклад в годовую эффективную дозу облучения населения вносит радон?
59. В какой цепи распада появляется изотоп радона 222?
60. В какой цепи распада появляется изотоп радона 220?
61. Нарисуйте цепочку распада радия 226.
62. Биологическое действие изотопов радона и его дочерних продуктов.
63. Что такое ЭРОА радона?
64. Радиоактивность воды и воздуха.
65. Радиоактивность растительного и животного мира.
66. Прямое и косвенное действие радиоактивного излучения.
67. Первичные радиационно-химические процессы.
68. Радиочувствительность и ее диапазоны в природе. Виды радиочувствительности.
69. Острая лучевая болезнь (ОЛБ). Степени проявления ОЛБ.
70. Токсичность радиоактивных веществ. Группы радиотоксичности.
71. Особенности загрязнения окружающей среды при ядерных взрывах.
72. Миграция радионуклидов в почвах, зависимость от поглощающих и закрепляющих свойств почвы.
73. Корневой и некорневой тип поступления РВ в растениях.
74. Миграция РВ по пищевым звеньям.
75. Защита от закрытых и открытых источников радиоизирующих излучений. Принципы защиты от РВ при авариях.
76. Методы и способы снижения РВ в растениях, животных продуктах питания, почвах.
77. Искусственная и естественная радиоактивность.
78. Радиоактивное заражение биосферы и его источники.
79. Токсичность радиоактивных веществ, группы токсичности.
80. Предельно допустимая доза и предел дозы.
81. Естественные источники излучения.
82. Внешнее и внутреннее облучение.
83. Техногенные источники излучения.
84. Миграция радионуклидов в почве.
85. Радиочувствительность организмов в лесном биогеоценозе.
86. Радиоактивный распад и ядерные реакции. Устойчивость ядер. Эмпирические правила устойчивости ядер.
87. Период полураспада – важная характеристика радиоизотопов. Способы определения  $T_{1/2}$  для долгоживущих радиоизотопов.
88. Энергия ядерных превращений. Выделение энергии при реакциях радиоактивного распада и синтеза.
89. Загрязнение природной среды при ядерных испытаниях.

90. Облучение в медицинских целях.
91. Особенности поглощения альфа-излучения веществом. Способность различных материалов поглощать альфа излучение. Материалы, используемые для защиты от альфа-излучения.
92. Особенности поглощения бетта-(электронов, позитронов) излучения веществом. Способность различных материалов поглощать бетта-излучение. Материалы, используемые для защиты от бетта-излучения.
93. Необходимость двойной защиты от бетта-излучения большой энергии.
94. Особенности поглощения гамма-излучения веществом. Способность различных материалов поглощать гамма излучение. Материалы, используемые для защиты от гамма излучения. Расчет толщины защитного экрана при известном коэффициенте ослабления.
95. Особенности поглощения нейтронов веществом. Способность различных материалов поглощать быстрые и медленные нейтроны. Материалы, используемые для защиты от нейтронов. Расчет толщины защитного экрана при известном коэффициенте ослабления.
96. Зависимость биологического эффекта от суммарной дозы, времени воздействия излучения, размеров поверхности, индивидуальных особенностей. Устойчивость различных организмов к действию радиации.
97. Эффективный период полураспада. Влияние биологического периода полураспада на дозу облучения от данного изотопа.
98. Действие больших доз радиации при однократном облучении и при хроническом облучении.
99. Три степени лучевой болезни.
100. Действие малых доз радиации. Концепция беспорогового действия радиации.
101. ФЗ «О радиационной безопасности населения». Основные принципы обеспечения безопасности. Основные гигиенические нормативы на территории РФ.
102. НРБ-99/2009. Основные принципы радиационного нормирования. Категории А, Б, В населения и основные пределы допустимых доз облучения от техногенных, медицинских и природных источников техногенного происхождения.
103. НРБ-99/2009. Зонирование территории при радиоактивном поражении.
104. ОСПОРБ (Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности). Общие требования к обеспечению радиационной безопасности.
105. ОСПОРБ. Обращение с радиоактивными отходами. Виды радиоактивных отходов.
106. Типы ядерных реакторов.
107. Характеристика реактора типа ВВЭР.
108. Реактор типа РБМК.
109. Реакторы на быстрых нейтронах.
110. Решение проблемы радиоактивных отходов (низкой и средней активности, высокой активности). Виды радиоактивных отходов. Способы утилизации отходов.
111. Влияние биологического периода полураспада на дозу облучения от данного изотопа.
112. Аварии на ядерных реакторах.



## ТЕСТЫ

## ПО КУРСУ «Радиационная экология»

*Цель теста:* дифференциация студентов по уровню знаний по дисциплине «Радиационная экология»

**Инструкция**

Тест выявляет уровень знаний по дисциплине «Радиационная экология». В тестах 105 заданий, рассчитанных на контроль знаний. Все задания с выбором одного правильного ответа. Необходимо обвести кружком букву перед правильным ответом.

**1. Что представляют альфа лучи?**

- А) поток ядер атомов гелия +
- В) поток электронов
- С) э/м излучение

**2. Что представляют бета лучи?**

- А) поток ядер атомов гелия
- В) поток электронов +
- С) э/м излучение

**3. Укажите радиоактивный элемент**

- А) кислород
- В) водород
- С) уран +

**4. Радиация измеряется в**

- А) км
- В) р/ч +
- С) а/ч

**5. Для обнаружения радиации применяется.**

- А) Амперметр
- В) счетчик Гейгера +
- С) Омметр

**6. Наиболее сильное радиационное облучение в быту мы получаем от...**

- А) Микроволновки
- В) холодильника
- С) газовой плиты +

**7. Основной поражающий фактор ядерного взрыва**

- А) ударная волна +
- В) световое излучение
- С) поток электронов

**8. Что определяет единица Грей**

- А) Гамма-эквивалент
- В) Поглощенную дозу +
- С) Экспозиционную дозу

**9. Что определяет единица Кл/кг**

- А) Гамма-эквивалент
- В) Поглощенную дозу
- С) Экспозиционную дозу +

**10. Что является единицей радиоактивности**

- А) Беккерель +
- В) Кл/кг
- С) Рентген

**11. Эквивалентная доза используется для оценки:**

- А) Биологического эффекта
- В) Поглощенной дозы с учетом качества излучения +
- С) Экспозиционной дозы

**12. Эффективная доза используется для оценки:**

- А) Меры риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности +
- В) Биологического эффекта различных видов ионизирующего излучения
- С) Количества ионов одного знака в единице массы воздуха

**13. В каких единицах измеряется радиоактивность**

- А) Бк +

- В) Р  
С) Рад
- 14. Взаимодействие радиации с атомами вызывает:**  
А) Радиоактивность  
В) Ионизацию +  
С) Фоновую радиацию
- 15. Мощность дозы с увеличением расстояния до объекта:**  
А) Увеличивается прямо пропорционально квадрату расстояния  
В) Уменьшается пропорционально кубу расстояния  
С) Уменьшается пропорционально квадрату расстояния +
- 16. Пусковым (первичным) этапом лучевого поражения является:**  
А. Химический этап лучевого воздействия.  
В. Биохимический этап лучевого воздействия.  
С. Физико-химический этап лучевого воздействия. +
- 17. Для молекулярных компонентов клетки в живых организмах в первичных радиобиологических процессах в большей степени характерно:**  
А. Прямое действие ионизирующих излучений.  
В. Непрямое и прямое действие ионизирующих излучений. +  
С. Непрямое действие ионизирующих излучений.
- 18. Какие виды излучений в большей степени вызывают двойные разрывы ДНК:**  
А. Рентгеновское и гамма-излучения;  
Б. Бета-излучения (электроны, позитроны);  
С). Альфа-частицы, протоны, осколки деления, тяжелые ядра, нейтроны. +
- 19. Критерием радиочувствительности является показатель:**  
А. ЛД<sub>50/30</sub> +  
В. ЛД<sub>100/30</sub>  
С. ЛД<sub>30/50</sub>
- 20. Биологические системы каких уровней организации более радиорезистентны к действию ИИ:**  
А. Многоклеточные.  
В. Одноклеточные. +  
С. Организмы млекопитающих
- 21. Какие организмы более радиочувствительны к действию ИИ:**  
А. Насекомые.  
В. Млекопитающие. +  
С. Растения.
- 22. К ранним лучевым повреждениям кожного покрова относят:**  
А. Лучевые ожоги. +  
В. Лучевая язва, лучевой рак (саркома кожи).  
С. Лучевой дерматит, лучевые ожоги, лучевой фиброз.
- 23. Ионизирующее излучение не:**  
А. Вызывает радиационную стерильность.  
В. Оказывает видимого влияния на половую потенцию. +  
С. Вызывает радиационную стерильность, но влияет на потенцию.
- 24. Какие виды излучений наиболее опасны для формирования катарактогенной дозы человека.**  
А. Гамма-излучение.  
В. Рентгеновское излучение.  
С. Нейтронное излучение. +
- 25. Наибольшую опасность для организмов представляет собой инкорпорация радиоактивных изотопов с периодами полураспада:**  
А. Десятки тысяч лет и более.  
В. Долей секунд до нескольких минут.  
С. От нескольких дней до нескольких лет. +
- 26. Снижение уровня радионуклидов в организме происходит по:**  
А. Биологическим и физическим закономерностям. +  
В. Закону радиоактивного распада.  
С. Физическим и химическим закономерностям.
- 27. Для целей нормирования канцерогенного действия радиации принята:**  
А. Пороговая концепция.  
В. Линейная пороговая  
С. Линейная беспороговая концепция. +

**28. Радиационный фон:**

- А. Синоним ЕРФ.
- В. Включает в себя ЕРФ и ТИЕРФ
- С. Состоит из ЕРФ, ТИЕРФ и ИРФ. +

**29. Естественную радиоактивность составляют:**

- А. Космические лучи и радионуклиды, присутствующие в биосфере в результате деятельности человека.
- В. Радионуклиды присутствующие в биосфере в результате деятельности человека и радиоактивные элементы земной коры.
- С. Природные радионуклиды и космические лучи. +

**30. Источником первичного космического излучения являются:**

- А. Солнечная инсоляция.
- В. Галактические туманности.
- С. Галактические туманности, инсоляция Солнца. +

**31. Вторичное космическое излучение возникает в результате:**

- А. Электронно-фотонных процессов.
- В. Электронно-фотонных и электронно-ядерных процессов. +
- С. Электронно-ядерных процессов.

**32. Космическое излучение на уровне моря в основном состоит из:**

- А. Нейтронного компонента.
- В. Жесткого компонента.
- С. Мягкого и жесткого компонента. +

**33. Природная радиоактивность обусловлена радиоактивными изотопами естественного происхождения присутствующими в:**

- А. Литосфере и биосфере момента возникновения Земли.
- В. Гидросфере, атмосфере и биосфере момента возникновения Земли.
- С. Во Всех оболочках Земли момента возникновения Земли. +

**34. Природная радиоактивность обусловлена радиоактивными изотопами:**

- А. Не входящими в состав радиоактивных семейств.
- В. Непрерывно, возникающих на Земле.
- С. Углерода-14, трития, бериллия-7, калия-40, кальция-48, рубидия-87 и др., семейств урана-238, тория-232, урана-235. +

**35. Главным источником поступления во внешнюю среду естественных радиоактивных веществ является:**

- А. Атмосфера Земли.
- В. Горные породы. +
- С. Воды морей и океанов.

**36. Основную дозу облучения от естественных источников радиации земного происхождения организм получает за счет:**

- А. Внутреннего поступления с водой и воздухом.
- В. Внутреннего поступления водой и пищей.
- С. Внутреннего поступления с пищей, водой и воздухом. +

**37. ТИЕРФ представляет собой:**

- А. Излучения от искусственных и естественных источников радиации.
- В. Излучения от искусственных источников радиации, претерпевших изменения в результате деятельности человека.
- С. Излучения от естественных источников радиации претерпевших изменения в результате деятельности человека. +

**38. ИРФ обусловлен:**

- А. Глобальными загрязнениями биосферы вследствие испытания ядерного оружия и поступающих в окружающую среду радионуклидов с полезными ископаемыми, извлеченными из недр.
- В. Загрязнениями окружающей среды в результате аварий на АЭС, отходами предприятий ядерной энергетики, источниками, используемыми в научных целях, медицине, народном хозяйстве, вследствие испытаний ядерного оружия. +
- С. Загрязнениями биосферы в результате аварий на АЭС, отходами предприятий ядерной энергетики, поступлениями в окружающую среду продуктов сгорания органического топлива.

**39. Естественная радиоактивность атмосферного воздуха представлена:**

- А. Аэрозолями калия, урана, радия, радиоактивными изотопами радона, торона, углерода, трития, находящихся в газообразном состоянии. +
- В. Тритием, углеродом -14, стронцием-90, цезием -137, йодом-131.
- С. Инертными радиоактивными газами – ксенон, криптон, аргон.

**40. Искусственная радиоактивность атмосферного воздуха м.б. обусловлена:**

- А. продуктами распада калия, урана, радия
- В. Инертными радиоактивными газами – ксенон, криптон, аргон, тритием, углеродом -14, стронцием-90, цезием -137, йодом-131 и др. +
- С. Аэрозолями калия, урана, радия, радиоактивными изотопами радона, торона, углерода, трития, находящихся в газообразном состоянии.

**41. Наиболее значимыми из природных радионуклидов в воздухе жилых и рабочих помещений являются:**

- А. Тритий, углерод-14, бериллий-7.
- В. Изотопы йода.
- С. Радон, торон. +

**42. Наибольшая концентрация природных радионуклидов обнаруживается в воздухе зданий построенных из:**

- А. Деревя.
- В. Кирпича.
- С. Бетона. +

**43. Снижение радиоактивности атмосферы при радиоактивных выбросах происходит главным образом за счет:**

- А. Осаждения и накопления радионуклидов в почве, донных отложениях и пищевых цепочках экосистем. +
- В. Радиоактивного распада.
- С. Переноса воздушными потоками и накопления в тропосфере, стратосфере, ионосфера.

**44. Радиоактивность водной среды формируется:**

- А. Радионуклидами естественного происхождения.
- В. Сбросами объектов ядерной энергетики.
- С. Радиоактивными продуктами ядерных взрывов, радионуклидами естественного происхождения, выбросами и сбросами объектов ядерной энергетики, естественными радионуклидами. +

**45. Естественная радиоактивность подземных вод в основном обусловлена содержанием:**

- А. Трития, углерода-14, бериллия-7.
- В. Калия-40, радия-226, радона-222. +
- С. Цезия-137, плутония-238.

**46. Наибольшей природной радиоактивностью обладают подземные воды:**

- А. Первого водоносного горизонта.
- В. Подземные воды в осадочных породах.
- С. Минеральные воды +

**47. Природная радиоактивность вод открытых водоемов обусловлена содержанием в них:**

- А. Урана-238, радия-226, радона -222, радона-220, калия-40. +
- В. Плутония-239, углерода-14, бериллия-7, трития.
- С. Стронция-90, кобальта-60, плутония-238.

**48. Степень радиоактивности речной воды повышается:**

- А. В период выпадения поверхностных осадков.
- В. Питания рек за счет подземных вод. +
- С. Как за счет поверхностных осадков, так и подземных вод.

**49. Накопление радона и торона в водоемах наблюдается:**

- А. В летний период года.
- В. Зимой. +
- С. Весной.

**50. Радиологическая характеристика вод морей и океанов зависит от:**

- А. Климатических условий.
- В. Гидрологических условий.
- С. Солевого состава. +

**51. При поступлении РВ в воду открытых водоемов в первую очередь происходит их:**

- А. Поглощение тканями гидробионтов и разбавление.
- В. Сорбция донными отложениями
- С. Разбавление и поглощение тканями гидробионтов. +

**52. При возрастании ионообменной активности грунта:**

- А. Степень накопления изотопов снижается.
- В. Остается неизменной.
- С. Степень накопления изотопов увеличивается. +

**53. Коэффициент накопления изотопов это отношение:**

- А. Удельной активности грунта к удельной активности воды. +

- В. Удельной активности воды к удельной активности грунта.  
 С. Активности воды к активности грунта.
- 54. Коэффициент накопления снижается с:**  
 А. Увеличением удельной активности воды. +  
 В. Снижением удельной активности грунта.  
 С. Увеличением активности грунта.
- 55. При снижении активности воды из донного грунта наблюдается процесс:**  
 А. Сорбции.  
 В. Абсорбции.  
 С. Десорбции. +
- 56. Коэффициент накопления РВ тканями гидробионтов зависит от:**  
 А. Вида гидробионта, физико-химических свойств радиоизотопов, удельной активности воды, ее солевого состава, температуры. +  
 В. От солевого состава, физико-химических свойств, температуры, удельной активности воды.  
 С. Удельной активности воды солевого состава воды, вида гидробионтов.
- 57. Интенсивность выведения РВ из организма гидробионтов выше:**  
 А. Чем выше удельная активность воды.  
 В. Чем ниже удельная активность воды.  
 С. Чем выше концентрация РВ в тканях. +
- 58. От строительных материалов, в производстве которых используются земные породы, зависит:**  
 А. Бета-фон в помещениях здания.  
 В. Гамма-фон в помещениях здания. +  
 С. Альфа-фон в помещениях здания.
- 59. Наибольшие значения радиационного фона установлены в домах из:**  
 А. Железобетона с глиноземом. +  
 В. Кирпича.  
 С. Дерева.
- 60. Радиоактивное загрязнение почвы обусловлено:**  
 А. Глобальными выпадениями РВ из атмосферы, выбросов твердых и жидких отходов предприятий ЯТЦ. +  
 В. Выбросами твердых и жидких отходов предприятий ЯТЦ.  
 С. Глобальными выпадениями РВ из атмосферы.
- 61. Радиоактивные вещества, отложившиеся на поверхности почвы могут мигрировать:**  
 А. В вертикальном направлении.  
 В. В горизонтальном и вертикальном направлении. +  
 С. В горизонтальном направлении.
- 62. Искусственные радионуклиды, находящиеся в почве:**  
 А. Быстро переходят в те же формы, в которых находятся стабильные изотопы и включаются в биогеохимические циклы.  
 В. Находясь в почвенном растворе, сохраняют свою специфическую форму, но с течением времени переходя в состояния, в которых находятся стабильные аналоги, включаются в биогеохимические циклы. +  
 С. Сохраняют свою специфическую форму и включаются в биогеохимические циклы.
- 63. Поглощение почвой большинства радионуклидов зависит от:**  
 А. Процесса поглощения их твердой фазой.  
 В. Процесса поглощения их почвенным раствором.  
 С. Процесса распределения между твердой и жидкой фазой. +
- 64. Интенсивность поглощения почвами РВ обуславливается:**  
 А. Типом почв, химическими свойствами радионуклидов.  
 В. Химическими и физико-химическими условиями среды.  
 С. Типом почв, химическими свойствами радионуклидов, химическими и физико-химическими условиями среды, концентрацией и формой изотопных и неизотопных носителей. +  
 D. Концентрацией и формой нахождения изотопных и неизотопных носителей.
- 65. Какие типы почв менее прочно удерживают радионуклиды:**  
 А. Глинистые и суглинистые.  
 В. Песчаные. +  
 С. Черноземные.
- 66. Для каких радионуклидов преобладает ионообменный механизм поглощения почвой:**  
 А. Радионуклидов стронция и др. +  
 В. Радионуклидов рутения и др.  
 С. Радионуклидов цезия и др.
- 67. Менее прочно фиксируются радионуклиды:**

А В кислых почвах. +

С. В нейтральных почвах.

В. В щелочных почвах.

**68. Поглощение почвой радионуклидов:**

А. Способствует миграции их вниз по профилю.

В. Способствует снижению уровня их поступления в растения. +

С. Повышает их доступность в растения.

**69. Накопление поглощенных радионуклидов в верхних слоях почвы:**

А. Повышает их доступность для растений. +

В. Способствует снижению уровня их поступления в растения.

С. Препятствует миграции их по профилю.

**70. Из трансурановых элементов наиболее доступным для биоты является:**

А. Плутоний.

В. Америций.

С. Нептуний. +

Д. Кюрий.

**71. Радиоактивность растительного и животного мира обусловлена изотопами:**

А. Радия -226, свинца-210, полония-210.

В. Стронция-90, цезия-210, кобальта-60.

С. Всеми радиоактивными изотопами, присутствующими в природе. +

Д. Калия-40, углерода-14, трития.

**72. Основным источником поступления естественных радиоактивных веществ в организм является:**

А. Питьевая вода.

В. Продукты животного происхождения.

С. Продукты растительного происхождения.

**73. Радиоактивность тела человека обусловлена изотопами:**

А. Стронция-90, цезия-210, йода-131.

В. Всеми радиоактивными изотопами, встречающимися в биосфере. +

С. Урана-238, тория-232, радия -226.

Д. Калия-40, углерода-14, трития.

**74. В каких органах и тканях человека присутствует наибольшее количество калия-40:**

А. Головном мозге.

В. Печени.

С. Жировой ткани.

Д. Мышцах. +

С. Костной ткани.

**75. В каких органах и тканях человека присутствует наибольшее количество радия-226:**

А. Легких.

В. Печени.

С. Яичниках.

Д. Мышцах.

С. Костной ткани. +

**76. Внутреннее облучение большинства органов и тканей человека обусловлено в основном присутствием в них:**

А. Рубидия-87.

В. Калия -40. +

С. Свинца-210.

**77. Фоновое облучение организма человека формируется за счет:**

А. Внутренних источников ИИ.

В. Внешних источников ИИ.

С. Внешних и внутренних ИИ. +

**78. Наибольшая суммарная годовая эквивалентная доза от природных источников ИИ в зонах с «нормальным» РФ создается за счет:**

А. Космогенных нуклидов.

В. Ряды урана-238. +

С. Космического излучения.

Д. Калия-40.

Е. Ряды тория-232.

Г. Рубидия-87.

**79. Внутреннее облучение для человека при ядерных и термоядерных взрывах создают:**

- A.  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ .
- B.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ . +
- C.  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ .

**80. Перечислите радионуклиды, определяющие в основном внешнее облучение человека при ядерных и термоядерных взрывах:**

- A.  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ . +
- B.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ .
- C.  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ .

**81. Внешнее и внутреннее облучение человека при ядерных и термоядерных взрывах создают:**

- A.  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ .
- B.  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ .
- C.  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ . +

**82. Радиоактивные осадки подразделяются на:**

- A. Местные и глобальные.
- B. Локальные и тропосферные.
- C. Местные тропосферные и стратосферные. +

**83. В зоне следа радиоактивного облака растения и животные подвергаются прежде всего воздействию:**

- A. Внешнего облучения. +
- B. Внутреннего облучения.
- C. Внешнего и внутреннего облучения.

**84. Основной вклад в поглощенную дозу у животных в зоне выброса радиоактивного следа вносит:**

- A. Бета-излучение.
- B. Гамма-излучение. +
- C. Альфа-излучение.

**85. Основной вклад в поглощенную дозу у растений в зоне выброса радиоактивного следа вносит:**

- A. Бета-излучение. +
- B. Гамма-излучение.
- C. Альфа-излучение.

**86. Скорость переноса радиоактивных аэрозолей в тропосфере и стратосфере значительно больше:**

- A. Вдоль параллели Земли. +
- B. В меридианном направлении.
- C. Одинакова в широтных и меридианных направлениях.

**87. При испытаниях ядерного оружия в зоне экватора полоса максимального тропосферного выпадения РВ смещается в сторону:**

- A. Южного полюса.
- B. Северного полюса.
- C. Оба полюса. +

**88. Решающая роль в очищении тропосферного воздуха от продуктов ядерного взрыва принадлежит:**

- A. Сухому выпадению радиоактивных частиц коагулированных с нерадиоактивной пылью.
- B. Атмосферным осадкам. +
- C. Турбулентному перемешиванию нижних и верхних воздушных масс.

**89. К отходам, образующимся при добыче урановой руды относятся:**

- A. Шахтные, рудные воды, отвалы, рудные пульпы.
- B. Отходы, состоящие из загрязненных шлаков, сплавов и т. д.
- C. Шахтные, рудные воды, отвалы, рудничный воздух. +

**90. При изготовлении ТВЭЛов образуются:**

- A. Аэрозоли урана, радия.
- B. Урансодержащие жидкие отходы, шлаки, сплавы и т. д. +
- C. Рудные отвалы, пульпы, шахтные воды.

**91. Радиоактивные отходы классифицируются:**

- A. По интенсивности излучения и периоду полураспада.
- B. Агрегатному состоянию и виду излучения.
- C. Агрегатному состоянию, виду излучения, активности,  $T_{1/2}$ . +

**92. Твердые РАО относят к соответствующей категории исходя из:**

- A. Мощности экспозиционной дозы на поверхности.
- B. Удельной активности альфа- и бета- излучения.
- C. Мощности экспозиционной дозы на поверхности и удельной активности альфа- и бета- излучения. +

**93. Жидкие и газообразные РАО классифицируются:**

- A. Как низко-, средне- и высоко- активные отходы. +
- B. По удельной активности альфа- и бета излучения.

С. По мощности дозы гамма-излучения.

**94. Среднеактивные отходы опасны:**

А. Только при попадании внутрь организма.

В. Как источник внешнего облучения. +

С. Как источник внешнего облучения, так и при попадании внутрь организма.

**95. Цепная реакция деления осуществляется при наличии в ядерном реакторе:**

А. Йода-131, цезия-137, стронция-90.

В. Кобальта-60, радия-226, висмута-214.

С. Урана-235, урана-233, плутония-239, плутония-141. +

**96. В качестве замедлителей нейтронов в ядерных реакторах различных типов могут использоваться:**

А. Обычная вода, водяной пар, тяжелая вода, органические жидкости, графит, бериллий, углекислый газ, гидриды металлов. +

В. Алюминий, цирконий, сплавы на основе магния, различные марки стали.

С. Обычная вода, водяной пар, органические жидкости, гелий, воздух, углекислый газ, жидкие металлы.

**97. В качестве теплоносителей в ядерных реакторах различных типов могут использоваться:**

А. Обычная вода, водяной пар, тяжелая вода, органические жидкости, графит, бериллий, углекислый газ, гидриды металлов.

В. Алюминий, цирконий, сплавы на основе магния, различные марки стали.

С. Обычная вода, водяной пар, органические жидкости, гелий, воздух, углекислый газ, жидкие металлы. +

**98. Система радиационного контроля за состоянием окружающей среды в связи с выработкой ресурса реакторной установки:**

А. Продолжает функционировать в том же объеме, что и при нормальной эксплуатации АЭС. +

В. Радиационный контроль переходит в режим аварийной работы.

С. Может подвергнуться модификации в зависимости от радиационной обстановки.

**99. Главным источником радиоактивных отходов, образующихся при работе АЭС является:**

А. Газовый контур, контур охлаждения.

В. Отходы активационного происхождения.

С. Основной технологический контур. +

**100. При сжигании части ТРАО дымовые газы:**

А. Проходят через систему грубых фильтров, затем выбрасываются в вентиляционную трубу.

В. Проходят через систему грубых и тонких фильтров, затем выбрасываются в вентиляционную трубу. +

С. Сразу поступают в вентиляционную систему.

**101. Мультибарьерная концепция обращения с отвержденными жидкими радиоактивными отходами основана на использовании:**

А. Природных барьеров.

В. Инженерных барьеров.

С. Естественных и искусственных барьеров. +

**102. Природными барьерами, затрудняющими выход радионуклидов из радиоактивных отходов в окружающую среду являются:**

А. Скальные породы, соляные выработки, стволы шахт и т. п. +

В. Бентонитовые глины, скальные породы, цемент.

С. Соляные выработки, буферные материалы, засыпочные материалы для изоляции штреков, шахт.

**103. Санитарно-защитная зона для пунктов захоронения радиоактивных отходов устанавливается радиусом:**

А. 500 м

В. 1500 м

С. 1000 м +

**104. Геологический профиль участков, отводимых под пункты захоронения РАО должен быть представлен:**

А. Крупно-зернистыми породами.

В. Средне-зернистыми породами.

С. Средне- и мелкозернистыми породами. +

**105. Наиболее благоприятен для размещения пунктов захоронения РАО:**

А. Холмистый рельеф местности.

В. Равнинный всхолмленный. +

С. Равнинный.



## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### 1. Исследования мощности внешнего гамма - излучения

#### 1.1. Средства измерений

При проведении гамма-съемки применяются поисковые радиометры (СРП 68-01) и дозиметры (ДКГ-03Д). Показания поисковых радиометров очень сильно зависят от энергии гамма-излучения, за счет чего может возникать разница в показаниях между поисковыми приборами и дозиметрами. В связи с этим, оценка значения мощности дозы гамма-излучения (МЭД ГИ) осуществляется только с использованием дозиметров.

Подготовка приборов к измерениям МЭД ГИ, проведение измерений, контроль за стабильностью работы радиометров выполняются в соответствии с их «Техническим описанием и инструкцией по эксплуатации».

Для приборов, имеющих в своем составе контрольный источник (СРП-68), отклонение от установленного для данного прибора показания от контрольного источника, взятого из свидетельства о поверке, не должно превышать 10%. Контроль проводится ежедневно в начале и конце рабочей смены при одинаковом фиксированном положении контрольного источника относительно датчика.

Приборы СРП-68 представляют собой измерители потока и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Принцип работы приборов основан на преобразовании физической информации в электрические сигналы с последующим измерением их параметров. Функцию преобразователя выполняют сцинтиллятор на основе NaI(Tl) и фотоэлектронный умножитель, преобразующий световые вспышки сцинтиллятора в электрические сигналы.

Аналоговые импульсные сигналы, снимаемые с фотоэлектронного умножителя, после усиления отделяются от шумов и преобразуются в последовательность логических сигналов, средняя частота повторения которых пропорциональна измеряемой физической величине. Эта последовательность поступает на интегрирующий линейный измеритель средней скорости счета, показания которого выводятся на стрелочный прибор. Шкала стрелочного прибора отградуирована в единицах потока и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения.

Принцип работы дозиметра ДКГ-03Д «Грач» основан на подсчете импульсов, поступающих со счетчиков Гейгера-Мюллера. Питание счетчиков обеспечивается напряжением 400В, создаваемым встроенным высоковольтным преобразователем. Обработка полученных данных осуществляется микропроцессором, а результат измерения представляется на жидкокристаллическом табло. Все узлы дозиметра расположены в компактном корпусе из пластмассы.

#### 1.2. Измерение мощности внешнего гамма-излучения на территории

Определение мощности эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения (МЭД ГИ) на объектах предприятия и на местности производится для оценки радиационной обстановки, контроля за её изменением и прогноза дозы облучения работников. Повышение МЭД ГИ является основным обнаруживаемым в практике фактором, свидетельствующим о появлении радиоактивного загрязнения.

*В рамках данных методических рекомендаций контролируемым параметром является мощность эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения территории, представленная в единицах мощности эквивалентной дозы  $H$  (мкЗв/час). Допускается измерять и представлять результаты в единицах мощности экспозиционной дозы гамма-излучения  $X$  (мкР/час), связанной с  $H$  (мкЗв/час) приближенным соотношением:*

$$H = 0,009 \cdot X$$

Целью проведения пешеходной гамма-съемки являются:

- определение мощности дозы внешнего гамма-излучения на обследуемой территории;
- выявление участков территории с аномальными значениями гамма-фона;
- выявление неучтенных источников ионизирующего излучения.

Пешеходная гамма-съемка выполняется при отсутствии снежного и ледяного покрова на обследуемой территории.

Перед началом проведения пешеходной гамма-съемки контролируемой территории проводится измерение МЭД внешнего гамма-излучения на открытой местности  $H_0$  (мкЗв/час). Измерение  $H_0$  производится не менее чем в 5-ти точках, расположенных на расстоянии не менее 30-ти метров от обследуемой территории, удаленных от автомобильных дорог и существующих зданий. Точки измерений следует выбирать на участках местности с естественным грунтом, не имеющих локальных техногенных изменений (щебень, песок, асфальт) и радиоактивных загрязнений. При измерениях блок детектирования располагают на высоте 1-го метра над поверхностью земли. Время измерения в каждой точке дозиметрами типа ДКГ-03Д должно быть таким, чтобы случайная составляющая погрешности оценки значения результата измерения не превышала 20%.

Критерием допустимых значений ( $A$ ) для данной обследуемой территории выбирается величина:

$$A = H_0 + \Delta_0 + 0,05; \text{ (мкЗв/час)}$$

где:  $H_0$  – МЭД ГИ на открытой местности;

$\Delta_0$  – погрешность результатов измерений;

0,05 – общепринятое значение аномального превышения МЭД гамма-излучения над фоном местности, соответствует 3-х кратному среднеквадратичному отклонению от фона.

В зависимости от площади измеряемой территории пешеходная гамма-съемка выполняется в масштабах 1:500 (при площади до 1 га), 1:1000 (при площади от 1 га до 10 га) и 1:2000 (при площади более 10 га).

Маршрутную гамма-съемку территории следует проводить с одновременным использованием поисковых гамма-радиометров и дозиметров

Измерение гамма-излучения проводится по предварительно намеченным на рабочей схеме маршрутам-профилям (поисковым прибором) и в узлах масштабной сетки – фиксированные измерения (дозиметром). Кроме того, более детальному обследованию подвергаются объекты, расположенные между маршрутами, на которых вероятность радиоактивного загрязнения повышена (ямы, канавы, кучи мусора и т.п.).

При движении по маршруту производится прослушивание регистрируемых импульсов по звуковому сигналу или контроль по стрелочному индикатору при непрерывном медленном перемещении торца датчика перпендикулярно линии движения (вправо-влево и т. д.) на высоте 10-20 см. над поверхностью, что позволяет охватить полосы шириной 1,5-2,0 м.

При измерении МЭД ГИ Н (мкЗв/час) в узлах масштабной сетки (для масштаба 1:500 – 5мх5м, для масштаба 1:1000 – 10мх10м, для масштаба 1:2000 – 20мх20м) детектор дозиметра прикладывается к земной поверхности. При движении по маршруту дозиметрист, зафиксировав на слух повышение частоты импульсов и (или) резкое отклонение стрелки индикатора, останавливается и производит внеочередное фиксированное измерение дозиметром.

Полученные значения мощности дозы гамма-излучения наносятся в узлах масштабной сетки на рабочую план-схему или карту гамма - поля.

После проведения пешеходной гамма-съемки территории оформляется протокол дозиметрического обследования с прилагаемой план - схемой.

Обнаруженные участки со значением МЭД гамма-излучения, превышающими критерий А рассматриваются как аномальные. Если повышенное значение МЭД ГИ, не связано с очевидным источником (облицовка зданий, покрытие автодорог, изменение геометрии наблюдений, изменение типа горных пород и т. п.) проводится детальное обследование участка. Сеть измерений выбирается в зависимости от размеров аномалии (от 0,5 х 0,5 метров до 1,0 х 1,0 метров). При этом необходимо определить общие размеры аномального участка, найти и обозначить на местности эпицентры локальных аномалий, замерить в них максимальное значение мощности дозы, провести углубленное обследование для определения типа аномалии.

### **1.3.Измерение мощности внешнего гамма-излучения в зданиях и сооружениях**

Измерение мощности внешнего гамма-излучения проводится в соответствии с Методическим указанием «Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий» (МУ 2.6.1.715-98)

Контролируемой величиной в зданиях и сооружениях, как при приемке их в эксплуатацию после завершения строительства (реконструкции или капитального ремонта), так и при их эксплуатации является мощность эквивалентной дозы (МЭД ГИ) Н (мкЗв/ч) внешнего гамма-излучения.

Непосредственно перед проведением замеров МЭД в зданиях, как и в предыдущем случае, проводятся измерения на открытой местности  $N_0$  (мкЗв/ч) вблизи обследуемого здания не менее чем в 5 точках, расположенных на расстоянии от 30 до 100 м от объекта обследования и не ближе 20 м друг от друга.

В качестве измеренного значения МЭД гамма-излучения на открытой местности за  $N_0$  принимают наименьшее значение из полученных результатов измерений  $N_0$  в каждой точке, а за случайную составляющую погрешность этого результата  $\Delta_0$  – соответствующую величину погрешности для результата измерений в этой точке.

Результат измерения МЭД гамма-излучения на открытой местности вблизи обследуемого здания представляют в виде:

$$N_0 \pm \Delta_0 \text{ мкЗв/ч.}$$

Для предварительной оценки радиационной обстановки в помещениях с целью выявления возможных локальных источников гамма-излучения проводят предварительное обследование, для проведения которого используют высокочувствительные гамма-радиометры типа СРП-68.

С поисковым радиометром (дозиметром) производят обход всех обследуемых зданий по периметру каждой комнаты, производя замеры на высоте 1 м от пола на расстоянии 5-10 см от стен, и по оси каждой комнаты, производя замеры на высоте 5-10 см над полом. При обнаружении локальных повышений показаний используемого прибора, производят поиск максимума и фиксируют в журнале его положение и показания прибора в точке максимума. Кроме того, в журнал заносят максимальные показания прибора в каждом помещении.

Измерения МЭД ГИ внешнего гамма-излучения в каждом обследуемом помещении выполняется в точке, расположенной в его центре на высоте 1м от пола, а также в выявленных участках с максимальным значением МЭД ГИ.

Число повторных измерений  $N$  выбирают из условий, чтобы случайная составляющая относительной погрешности среднего значения результата не превышала 20%.

Результат измерения МЭД гамма-излучения в данном помещении представляют в форме:

$$H \pm \Delta, \text{мкЗв/ч.}$$

Результаты измерений заносятся в рабочий журнал.

В зависимости от результатов оценки максимального значения измеренной мощности дозы в помещении принимаются следующие варианты решений:

Помещение считается удовлетворяющим нормативу, приведенному в НРБ-99, если значение МЭД в этом помещении ( $H$ , мкЗв/ч) с учетом погрешности ( $\Delta\Sigma$ , мкЗв/ч) удовлетворяет условию:

$$H - H_0 + \Delta\Sigma \leq 0,2 \text{ мкЗв/ч,}$$

где:  $H_0$  - измеренное значение МЭД на открытой местности,  $\Delta\Sigma$  - суммарная погрешность оценки разности двух величин –  $H$  и  $H_0$  (мкЗв/ч).

Если данное условие не выполняется из-за большой погрешности оценки значения МЭД, то проводят дополнительное измерение с целью снижения суммарной погрешности измерения, делают большее количество измерений или используя дозиметры, имеющие меньшее значение основной погрешности.

Если по результатам измерений не выполняются условия НРБ-99, принимаются меры по выявлению причин повышенного значения мощности дозы гамма-излучения и решается вопрос о возможности их устранения, после чего измерения повторяют.

## 2.Радоноопасность окружающей среды

Радоноопасность окружающей среды характеризуется плотностью потока радона с поверхности грунта территории и содержанием радона в воздухе построенных зданий и сооружений.

### 2.1.Оценка территории на радоноопасность

Оценка потенциальной радоноопасности территории осуществляется по комплексу геологических и геофизических признаков. К геологическим признакам относятся: наличие определенных петрографических типов пород, разрывных нарушений, сейсмическая активность территории, присутствие радона в подземных водах и выходы радоновых источников на поверхность. Геофизические признаки включают: высокую удельную активность радия в породах, слагающих геологический разрез; уровни объемной активности ОА радона (концентрация) в почвенном воздухе, ЭРОА радона в зданиях и сооружениях, эксплуатируемых на исследуемой территории и в прилегающей зоне. Наличие данных о зарегистрированных значениях эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) радона, превышающих 100 Бк/куб.м, в эксплуатируемых в исследуемом районе зданиях служит основанием для классификации территории как потенциально радоноопасной.

Измерения ОА радона в почвенном воздухе и плотности потока радона должны производиться в контрольных точках, расположенных в узлах прямоугольной сетки с шагом, определяемым с учетом потенциальной радоноопасности участка согласно таблице 1. Число контрольных точек в пределах застраиваемой площади участка должно быть не менее 20.

Таблица 1. Шаг сетки расположения контрольных точек.

Характеристика участка	Рекомендуемый шаг сетки расположения контрольных точек, м	
	на незастраиваемой площади	на застраиваемой площади
Потенциально радонобезопасный	-	20x10
Потенциально радоноопасный	50x25	10x5

Измерение плотности потока радона должно производиться на поверхности почвы, дна котлована или на нижней отметке фундамента здания.

Не допускается проведение измерений на поверхности льда и на площадках, залитых водой.

Основными изотопами радона являются радон- 222- продукт распада радия –226 из урановой цепочки природных радионуклидов и радон-220 (торон) из ториевой цепочки. Элемент радон является благородным газом и оба изотопа распадаются на изотопы твердых элементов, атомы которых присоединяются к присутствующим в воздухе центрам конденсации и частицам пыли. Облучение радоном –220 встречается реже. Радон-222 имеет период полураспада 3,82 суток и посредством испускания альфа-частицы трансформируется в полоний-218, который в свою очередь распадается до свинца –210 и в конечном итоге до стабильного свинца-206. Являясь радиоактивным газом, всегда присутствующим в воздухе, радон и его дочерние продукты в основном определяют внутреннее облучение человека. Биологические эффекты вызываются в основном ингаляционным поступлением радона и его дочерних продуктов в организм человека

с воздухом, обуславливая повышенный риск возникновения рака легких, в связи с чем его относят к наиболее опасным из природных источников радиации. Радон присутствует на всех рабочих местах, с ним связано формирование более половины коллективной дозы облучения населения, в связи с этим нормативными документами регламентируется содержание радона в воздухе.

Оценка потенциальной радоноопасности территории (МУ 2.6.1.715-98) определяется следующими факторами, перечисленными ниже в порядке убывания своей значимости:

- ЭРОА или ОА изотопов радона в эксплуатируемых зданиях, расположенных на данной территории;
- плотностью потока (интенсивностью эксхалляции) радона ( $\text{мБк/с}\cdot\text{м}^2$ ) с поверхности земли;
- ОА радона в почвенном воздухе на глубине 1 метра от поверхности земли;
- удельной активностью радия-226 в слоях пород геологических разрезов.

В таблице 2 дана приближенная оценка потенциальной радоноопасности территорий, разбитой на 3 категории. Допускается производить оценку потенциальной радоноопасности на основе известного значения одного из четырех факторов, приведенных в таблице. Если известны значения двух или более факторов, то потенциальную радоноопасность территории оценивают по значению, соответствующему наибольшей степени потенциальной радоноопасности.

Таблица 2. Категория потенциальной радоноопасности территории.

Категория потенциальной радоноопасности территории	ЭРОА изотопов радона, Бк/м <sup>3</sup>	Плотность потока радона, мБк/с·м <sup>2</sup>	ОА радона в почв. возд., кБк/м <sup>3</sup>	Удельная активность радия-226, Бк/кг
1	<25	<20	<10	<100
2	25-100	20-80	10-40	100-400
3	<100	<80	<40	<400

Регламентируемыми параметрами являются интенсивность выделения радона с поверхности земли, объемная активность (ОА) или эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) радона в воздухе помещений.

## 2.2.Измерение плотности потока радона с поверхности земли с помощью радиометра радона РРА-01 М -03

Средством измерений является радиометр радона РРА-01 М -03, измеряющий дифференциальную (мгновенную) объемную активность радона (ОАР) в диапазоне 20-20000 Бк/м<sup>3</sup>, с допускаемой основной относительной погрешностью в диапазоне ОАР 20-100 Бк/м<sup>3</sup> - 30%, в диапазоне ОАР 100-20000 Бк/м<sup>3</sup> - 20%, а также вспомогательное пробоотборное устройство ПОУ-4.

Измерение ОА радона-222 и торона-220 основано на электростатическом осаждении положительно-заряженных ионов <sup>218</sup>Po(RaA) и <sup>216</sup>Po(ThA) из отобранной пробы воздуха на поверхность ППД с помощью высокого положительного потенциала, поданного на электрод (сетку) измерительной камеры. Активность радона-222 и торона-220 определяется соответственно по количеству зарегистрированных альфа-частиц при распаде RaA и ThA альфа-спектрометрическим методом.

Измерение плотности потока радона (ППР) основано на определении количества радона-222, накопленного в пробоотборнике или в камере РРА в течение фиксированного времени, за счет поступления с поверхности почвы известной площади.

При выполнении измерений соблюдают следующие условия:

- температура окружающего воздуха от +5°C до +40°C;
- относительная влажность до 85% при +25°C;
- атмосферное давление 630÷800 мм рт. ст.;

При отборе проб соблюдают следующие условия:

- температура окружающего воздуха от 0°C до +50°C;
- относительная влажность до 95% при +25°C;
- атмосферное давление 630÷800 мм рт. ст.
- не допускается проведение отбора проб с поверхности мерзлого или залитого водой грунта.

Выбор расположения и количества контрольных точек для проведения измерений ППР в пределах обследуемого участка местности регламентируется требованиями МГСН 2.02-97 или нормативными документами в строительстве, действующими на данной территории.

Вокруг контрольной точки проводится подготовка горизонтального участка размером 0,2 x 0,2 м для проведения измерений. Подготовка заключается в зачистке от снега, мусора, растительности, крупных камней, рыхления на глубину 3-5 см, выравнивания поверхности участка. Измерение проводится не ранее, чем через 20 минут после подготовки участка.

Измерение ППР проводят двумя методиками:

1. С отбором проб радона в пробоотборники в полевых условиях и последующим измерением ОАР в пробах с помощью РРА на месте отбора проб или в стационарных условиях;
2. С отбором проб радона непосредственно в камеру РРА в полевых условиях и измерением на месте отбора проб.

Первый способ предназначен для экспрессных измерений ППР в диапазоне от 10 до 100 мБк/(с·м<sup>2</sup>) и рекомендуется для начального обследования участка.

Второй способ предназначен для измерения ППР в диапазоне 80-1000 мБк/(с·м<sup>2</sup>) и рекомендуется для повторного измерения ППР в контрольных точках, для которых по результатам начального обследования получены значения ППР, превышающие регламентированную величину 80 мБк/(с·м<sup>2</sup>).

Измерение ОАР в пробе обеими методиками включает в себя:

- измерение фоновой ОАР в камере РРА;
- перемешивание пробы между пробоотборником и измерительной камерой РРА;
- измерение ОАР в камере РРА.

При определении фоновой ОАР, согласно инструкции по эксплуатации РРА осуществляют не менее 5-и замеров. Среднее значение  $Q_{\phi}$ , Бк·м<sup>-3</sup>, определяют по формуле:

$$Q_{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{\phi i} \quad (1)$$

где:  $Q_{\phi i}$  – результат i-ого измерения, Бк·м<sup>-3</sup>; N – число измерений.

$Q_{\phi}$  – не должна превышать значения собственного фона, указанного в паспорте РРА.

При определении ОАР в камере РРА, в соответствии с инструкцией по эксплуатации, также выполняют не менее 5-и измерений. ОАР  $Q$ , Бк·м<sup>-3</sup>, определяют по формуле:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_i \quad (2)$$

где:  $Q_i$  – результат i – измерения, Бк·м<sup>-3</sup>; N – число измерений.

Полученные результаты записывают в протокол измерений.

Вычисление ППР радона по результатам измерений с помощью методики-1 выполняют по формуле:

$$ППР = \left( Q * \left( 1 + \frac{V_2}{V_1} \right) - Q_{\phi} * \frac{V_2}{V_1} \right) * \exp(-\lambda \cdot t) * \frac{V_1 + V_3}{T \cdot S_1},$$

где:  $Q$  – ОАР, вычисленная по формуле (2), Бк·м<sup>-3</sup>;

$Q_{\phi}$  – фоновая ОАР, вычисленная по формуле (1), Бк·м<sup>-3</sup>;

$V_2$  – объем измерительной камеры РРА, 1,7 л;

$V_1$  – объем пробы в пробоотборнике, 1,1 л;

$t$  – время, прошедшее от окончания отбора пробы до начала измерений, мин.;

$\lambda$  – постоянная распада <sup>222</sup>Rn,  $1,26 \cdot 10^{-4}$  мин<sup>-1</sup>;

$V_3$  – свободный объем камеры-1, 0,6 л;

$T$  – время работы воздухоподогревателя ПОУ, 300 с;

$S_1$  – площадь сбора радона камерой-1- 0,0154 м<sup>2</sup>;

Погрешность определения ППР при условии выполнения требований методики составляет:

$\delta ППР = \pm 30\%$  при ППР от 50 до 100 мБк/(с·м<sup>2</sup>),

$\delta ППР = \pm 40\%$  при ППР от 20 до 50 мБк/(с·м<sup>2</sup>).

Вычисление ППР радона по результатам измерений с помощью методики-2 выполняют по формуле:

$$ППР = \left( Q - Q_{\phi} \right) * \frac{V_2 + V_3}{T \cdot S_2},$$

где:  $Q$  – ОАР, вычисленная по формуле (2), Бк·м<sup>-3</sup>;

$Q_{\phi}$  – фоновая ОАР, вычисленная по формуле (1), Бк·м<sup>-3</sup>;

$V_2$  – объем измерительной камеры РРА, 1,7 л;

$V_3$  – свободный объем камеры-2 и соединительных трубок, 0,2 л;

$T$  – время работы воздухоподогревателя ПОУ, 300 с;

$S_2$  – площадь сбора радона камерой-2- 0,0154 м<sup>2</sup>.

Погрешность определения ППР при условии выполнения требований методики составляет:

$\delta ППР = \pm 30\%$  при ППР от 500 до 10000 мБк/(с·м<sup>2</sup>),

$\delta ППР = \pm 40\%$  при ППР от 80 до 500 мБк/(с·м<sup>2</sup>).

### 2.3. Измерение объемной активности и расчёт эквивалентной равновесной активности радона в воздухе помещений с помощью радиометра радона РРА-01 М-03

Средством измерений является радиометр радона РРА-01 М-03, а также вспомогательное пробоотборное устройство ПОУ-4.

Измерение ОАР в воздухе основано на отборе пробы воздуха в пробоотборник и последующем определении ОАР в пробоотборнике путем перемешивания пробы между объемами пробоотборника и измерительной камеры РРА и измерением ОАР в камере РРА.

При выполнении измерений необходимо соблюдать вышеперечисленные климатические условия.

Измерение ОАР в пробе включает в себя:

- измерение фоновой ОАР в камере РРА;
- перемешивание пробы между пробоотборником и измерительной камерой РРА;
- измерение ОАР в камере РРА.

При измерении фоновой ОАР, как и в предыдущем случае выполняют не менее 5-и замеров. Среднее значение  $Q_{\phi}$ , Бк·м<sup>-3</sup>, определяют по формуле (1)

При измерении ОАР в камере РРА, в соответствии с инструкцией по эксплуатации выполняют не менее 5-и замеров. ОАР  $Q$ , Бк·м<sup>-3</sup>, определяют по формуле (2).

Полученные результаты записывают в протокол измерений.

ОАР в пробе –  $Q_n$ , Бк·м<sup>-3</sup>, определяют по формуле:

$$Q_n = \left( Q * \left( 1 + \frac{V_2}{V_1} \right) - Q_{\phi} * \frac{V_2}{V_1} \right) * \exp(-\lambda \cdot t) \quad (3)$$

где:  $Q$  – ОАР вычисленная по формул (2), Бк·м<sup>-3</sup>;

$Q_{\phi}$  – ОАР, вычисленная по формуле (1), Бк·м<sup>-3</sup>;

$V_2$  – объем измерительной камеры РРА, 1,7 л;

$V_1$  – объем пробы в пробоотборнике, 1,1 л;

$t$  – время, прошедшее от окончания отбора пробы до начала измерения, мин.;

$\lambda$  – постоянная распада <sup>222</sup>Rn, 1,26·10<sup>-4</sup> мин<sup>-1</sup>.

Погрешность определения ОАР, при условии выполнения требований настоящей рекомендации, составляет:

$\delta Q_n = \pm 40\%$  при ОАР от 30 до 150 Бк/м<sup>3</sup>,

$\delta Q_n = \pm 30\%$  при ОАР от 150 до 30000 Бк/м<sup>3</sup>.

Контролируемой величиной в зданиях и сооружениях, согласно НРБ-99, является среднегодовое значение эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) изотопов радона и торона в воздухе помещений, равное:

$$C_{cp} = ЭРОА_{Rn} + 4,6 \times ЭРОА_{Tn},$$

где:  $ЭРОА_{Rn} = 0,104 * A_{RaA} + 0,514 * A_{RaB} + 0,382 * A_{RaC}$ ,

$ЭРОА_{Tn} = 0,913 * A_{ThB} + 0,087 * A_{ThC}$ ,

$A_{RaA}$ ,  $A_{RaB}$ ,  $A_{RaC}$ ,  $A_{ThB}$  и  $A_{ThC}$  – объемная активность в воздухе RaA (<sup>218</sup>Po), RaB (<sup>214</sup>Pb), RaC (<sup>214</sup>Bi), ThB (<sup>212</sup>Pb) и ThC (<sup>212</sup>Bi), соответственно, в Бк/м<sup>3</sup>.

Допускается проводить оценку  $ЭРОА_{Rn}$  по результатам объемной активности радона ( $A_{Rn}$ ). В этом случае для пересчета измеренных значений ОАР в значение  $ЭРОА_{Rn}$  используется коэффициент  $F_{Rn}$ , характеризующий сдвиг радиоактивного равновесия между радоном и его дочерними продуктами в воздухе:

$$ЭРОА_{Rn} = F_{Rn} \times A_{Rn}$$

Значение  $F_{Rn}$  определяют экспериментальным путём по результатам одновременных измерений  $A_{Rn}$  и  $ЭРОА_{Rn}$ . При отсутствии экспериментальных данных о значении  $F_{Rn}$ , его принимают равным 0,4.

При измерении среднегодового значения ЭРОА изотопов радона учитывают коэффициент вариации во времени значения ЭРОА радона  $V_{Rn}(t)$  и основных погрешностей применяемых средств измерений:

$$(ЭРОА_{Rn} + \Delta_{Rn}) * V_{Rn}(t) + 4,6 * (ЭРОА_{Tn} + \Delta_{Tn}) \leq 100 \text{ Бк/м}^3,$$

где:  $\Delta_{Rn}$  и  $\Delta_{Tn}$  – погрешности определения ЭРОА радона и торона в воздухе соответственно, значения которых рассчитываются по формуле:

$$\Delta_i = \delta_0 * ЭРОА_i / 100, \text{ Бк/м}^3,$$

в которой  $ЭРОА_i$  – измеренное значение ЭРОА радона (торона) в воздухе, а  $\delta_0$  – основная погрешность измерения, принимаемая по свидетельству о поверке средства измерения.

Значение коэффициента вариации зависит от геолого-геофизических характеристик грунта под зданием, климатических особенностей региона, типа здания, сезона года, в течение которого проводились измерения, а также от продолжительности измерения в используемой методике.

В качестве расчетных значений коэффициента вариации принимают среднее значение  $V_{Rn}(t)$ , определенное в процессе специальных исследований в данном регионе в зданиях различного типа, выполненных в разные сезоны года.

При отсутствии данных о фактических значениях коэффициента вариации их принимают по таблице 7 в зависимости от продолжительности измерения:

Таблица 7. Коэффициент вариации в зависимости от продолжительности измерения:

Продолжительность измерения		1 час	1-3 сутки	1-2 недели	1-3 месяца
Значение $V_{Rn}(t)$	Теплый сезон	3,0	2,3	1,8	1,5
	Холодный сезон	1,5	1,1	0,95	0,75

По результатам проведенных исследований составляется протокол радиационного обследования с картографическим материалом (Приложение 1).

### 3. Измерение активности радионуклидов в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс-2000»

При обнаружении радиационной аномалии при проведении пешеходной гамма-съемки проводится гамма-спектрометрическое исследование проб грунта, отобранных в пределах аномалии. Контролю подлежат радий-226, радий-228 и торий-228. В отдельных случаях значимую опасность могут представлять также калий-40 и цезий-137.

Для точного (с погрешностью не более 10 - 20%) измерения содержания ЕРН и цезия-137 в пробах и материалах используют гамма-спектрометрический анализ счетных образцов с обработкой результатов на ПЭВМ.

Основным итогом измерений является определение значений активности радия-226, радия-228, тория-228 (если не достигнуто радиоактивное равновесие с радием-228), калия-40 и цезия-137 в счетном образце и расчет погрешности каждого измеренного значения.

Регистрация излучения и обработка спектров при измерении счетных образцов производится с использованием программно-аппаратурного комплекса ПРОГРЕСС-2000 (далее «комплекс»). Обработка спектров выполняется автоматически, либо «матричным» методом, если радионуклиды ториевого семейства - радий-228 и торий-228 находятся в состоянии радиоактивного равновесия (радиоактивное равновесие в семействе радия-226 всегда достигается путем герметизации и выдержки образца), либо «генераторным» методом, если радиоактивное равновесие между радием-228 и торием-228 нарушено.

#### 3.1. Средства измерений

Для регистрации гамма-излучения от счетного образца используется гамма-спектрометрический тракт со сцинтилляционным блоком детектирования (СБД), который включает в себя сцинтиллятор, ФЭУ с делителем высокого напряжения и спектрометрический усилитель импульсов. В качестве сцинтиллятора используются кристаллы NaI(Tl) или CsI(Na) различных размеров и конфигураций.

СБД располагается в специальном свинцовом экране для его защиты от внешнего гамма-излучения.

Для проведения калибровки гамма-спектрометра по энергии и контроля за сохранностью параметров установки в состав спектрометра включается комбинированный источник Cs-137+K-40 в специальном сосуде для его экспонирования.

Для экспонирования счетных образцов в зависимости от геометрической конфигурации сцинтилляционного кристалла применяются различные измерительные кюветы.

Для преобразования аналогового спектрометрического сигнала, поступающего с выхода СБД, в цифровой применяется амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), выполненный либо в виде платы, встроенный в ПЭВМ, либо в виде отдельного блока, подключенного к порту ПЭВМ.

Управление работой АЦП производится при помощи специальных программ (драйверов), входящих в состав программного пакета ПРОГРЕСС-2000.

Обработка спектров, расчет значений активности и погрешности производится на ПЭВМ с использованием программного пакета ПРОГРЕСС-2000.

При аттестации гамма-спектрометра устанавливаются следующие метрологические характеристики:

- энергетический диапазон работы спектрометрического тракта;
- значения чувствительности для каждого из измеряемых нуклидов в измерительных энергетических интервалах;

- зависимость энергетического разрешения и эффективности регистрации гамма-квантов от энергии;

- значения минимально измеряемой активности;

- контрольная скорость счета от калибровочного источника в определенном энергетическом интервале.

Значения чувствительности заносятся в программу матричной обработки в виде матрицы. Коэффициенты, характеризующие зависимость энергетического разрешения и эффективности регистрации гамма-квантов от энергии, заносятся в программу генератора спектров.

Все встречаемые на практике задачи можно условно разделить на три класса:

1. Построение энергетической шкалы. Задачи этого класса определяют зависимость энергии от номера канала. При этом могут быть использованы различные алгоритмы поиска пиков и граничных энергий гамма

спектра, или сравнения измеренного спектра с опорным. В результате обработки ПРОГРЕСС-2000 строит зависимость энергии от номера канала и записывает ее в измерительное устройство. При этом в таблицу результатов выводятся позиции двух реперов и контрольная скорость счета на некотором энергетическом интервале. Как правило в качестве реперов используются энергии пиков полного поглощения или граничные энергии гамма спектров. При каждой обработке программа устанавливает маркеры в соответствующие реперам позиции.

2. Сохранение спектра на диске. Задачи этого класса используются для измерений фона или спектров градуировочных источников. В том случае, если на диске уже существует файл со спектром измеренным ранее ПРОГРЕСС-2000 сравнивает этот спектр с измеряемым, и в том случае, когда спектры статистически достоверно отличаются друг от друга выводит в статусной строке сообщение: "Новый фон отличается от измеренного ранее". В таблицу результатов выводятся скорости счета на контрольных энергетических интервалах. После значения скорости счета для измеренного спектра в скобках приводится скорость счета на том же интервале для спектра измеренного ранее.

3. Расчет активности. ПРОГРЕСС-2000 представляет измеренный спектр как сумму спектров отдельных радионуклидов. Полученные значения активности и погрешности для каждого радионуклида выводятся в таблицу результатов. Используя кнопки панели инструментов пользователь может изменить предполагаемый радионуклидный состав. В зависимости от состояния переключателя на экран вместе с измеряемым спектром выводится сумма спектров всех радионуклидов, или спектр одного из них.

### 3.2. Матричный метод обработки сцинтилляционных гамма-спектров

Алгоритмы обработки спектров специфичны для радионуклидного состава излучателей исследуемого образца. Здесь описаны принципы построения таких алгоритмов, составляющие основу программ обработки спектров в программной среде ПРОГРЕСС.

Измеренная спектрограмма представляется как сумма функций отклика спектрометра на спектры излучения радионуклидов, предположительно входящих в состав счетного образца. В предполагаемый радионуклидный состав могут входить не только отдельные нуклиды, такие как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  и т.д., но и семейства радионуклидов. В состав одного семейства включаются радионуклиды, пребывающие в состоянии радиоактивного равновесия, что позволяет характеризовать все семейство одной функцией отклика.

Матричный метод используется для обработки сцинтилляционных спектров проб известного радионуклидного состава.

Для обработки спектрограммы матричным методом энергетический диапазон спектрометра разбивается на отдельные интервалы. Ширина и положение интервалов для каждой конкретной задачи определяются отдельно из условия максимальной устойчивости решения системы уравнений (3) к вариациям значений скорости счета в интервалах.

Функции отклика спектрометра  $P_{ij}$  на излучение содержащихся в счетном образце радионуклидов или семейства нуклидов для каждой геометрии измерений определяются экспериментально при проведении первичной метрологической поверки при вводе установки в эксплуатацию и заносятся в специальный файл конфигурации в виде матрицы значений чувствительности детектора в энергетических интервалах:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij} - F_j}{A_i} \quad (1)$$

где:  $i$  - индекс радионуклида или семейства радионуклидов;

$j$  - индекс интервала;

$F_j$  - фоновая скорость счета в интервале  $j$ ;

$S_{ij}$  - скорость счета в интервале  $j$  от градуировочного источника, содержащего отдельный радионуклид или семейство нуклидов  $i$  с активностью  $A_i$

Для учета самопоглощения излучения веществом счетного образца в выражение (1) вводится зависимость чувствительности от массы пробы  $M$ . При этом функция отклика аппроксимируется следующим выражением:

$$P_{ij} = \alpha_{ij} \cdot \left[ -\exp(-\mu_{ij} \cdot M) \right] \cdot \frac{1}{M}, \quad (2)$$

где:  $\alpha_{ij}$  и  $\mu_{ij}$  - определяемые при первичной поверке коэффициенты.

Значения активности радионуклидов и семейств радионуклидов в счетном образце определяются из системы уравнений:

$$\sum_{i=1}^n A_i \cdot P_{ij} = S_j - F_j, \quad (3)$$



где:  $A_i$  - активность  $i$ -го радионуклида или семейства радионуклидов;  
 $S_j$  - скорость счета импульсов в интервале  $j$  при измерении счетного образца;  
 $F_j$  - фоновая скорость счета в  $j$ -м интервале.

Количество энергетических интервалов для обработки выбирается таким образом, что система уравнений (3) является избыточной, то есть количество уравнений превышает количество неизвестных.

Для решения системы уравнений (3) из нее производятся все возможные выборки по  $m$  уравнений ( $m$  - количество переменных в системе (3)). Каждая такая выборка представляет собой систему из  $m$  уравнений с  $m$  неизвестными, и решение такой системы производится методом Гаусса. Окончательно активность  $i$ -го радионуклида или семейства нуклидов определяется как

$$A_i = \frac{\sum_{k=1}^r \left( A_{ik} \cdot \frac{1}{\Delta A_{ik}^2} \right)}{\sum_{k=1}^r \frac{1}{\Delta A_{ik}^2}}, \quad (4)$$

где:  $A_{ik}$  - значение активности  $i$ -го радионуклида, полученное при решении  $k$ -й выборки;  
 $\Delta A_{ik}$  - значение погрешности активности  $i$ -го радионуклида, полученное при решении  $k$ -й выборки;  
 $r$  - количество выборок, равное числу сочетаний из  $n$  элементов по  $m$ .

Полная относительная погрешность активности  $i$ -го радионуклида или семейства радионуклидов ( $P_{\text{дов}}=0,95$ ) определяется как

$$\delta A_i = \delta A_{\text{sys}} + \frac{1}{A_i} \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial A}{\partial (S_j - F_j)} \right]^2 \cdot (\Delta S_j^2 + \Delta F_j^2)}, \quad (5)$$

где:  $\Delta S_j$  и  $\Delta F_j$  - абсолютные значения статистической погрешности ( $P_{\text{дов}}=0,95$ ) измеренной и фоновой скорости счета в интервале  $j$ ;  $\delta A_{\text{sys}}$  - неисключенная систематическая составляющая погрешности, определяемая при первичной поверке установки.

Значение производной  $\frac{\partial A}{\partial (S_j - F_j)}$  определяется численно путем решения системы (3) для значения скорости счета  $S_j$  измененного на 1 %.

После расчета значений активности и погрешности программа автоматически проводит проверку на предмет соответствия обрабатываемого спектра сумме спектров нуклидов или семейства нуклидов, наличие которых в счетном образце предполагается примененным алгоритмом. Критерием несоответствия спектров является отличие хотя бы в одном из энергетических интервалов измеренной скорости счета от суммы функций отклика, взятых с весами, равными рассчитанным значениям активности нуклидов и семейств нуклидов, на величину, превышающую погрешность. Причиной такого отличия может быть как нарушение регламента измерений, так и наличие в счетном образце дополнительных радионуклидов. Если априорная информация о пробе и визуальный анализ спектрограммы не исключают такой возможности, то дальнейшую обработку спектра рекомендуется проводить с использованием более общего, т.е. предполагающего более широкий радионуклидный состав, алгоритма. Кроме того, для получения более полной информации об измеряемой пробе может оказаться полезным исследование ее на альфа-спектрометре.

### 3.3. Требования к счетным образцам

При приготовлении счетного образца необходимо заполнять измерительный контейнер веществом пробы (почва, грунт, строительные материалы и др.) в строгом соответствии с аттестованной геометрией.

Контейнер с пробой (счетный образец) должен быть загерметизирован и выдержан перед измерением в течение не менее 2-х недель.

### 3.4. Выполнение измерений активности счетного образца

Процедура измерения на сцинтилляционном гамма-спектрометре предусматривает следующий алгоритм:

- проведение энергетической калибровки в начале каждого измерения фона или активности образца;
- измерения фона установки один раз в день в начале измерений в течение 30 мин.;
- измерение активности образца в течение 30 мин, однако, по желанию оператора набор спектра может быть как прекращен досрочно, так и продолжен по истечении установленного времени.

По истечении установленного времени экспозиции счетного образца происходит автоматическая остановка набора с переходом к обработке набранной спектрограммы матричным методом. По окончании обработки спектра матричным методом помимо рассчитанных значений активности радия-226, радия-228 (в радиоактивном равновесии с торием-228), калия-40 и цезия-137, наличие которых в счетном образце подразумевалось при выборе типа измерения, на экран выводятся соответствующие им значения статистической составляющей абсолютной погрешности измерения, рассчитанные для доверительного интервала 95%. В нижней части сообщения о результатах обработки приводятся значения скорости счета в используемых при обработке энергетических интервалах для обрабатываемого, расчетного и фоновых спектров. Если измеренный спектр хотя бы в одном из интервалов не соответствует сумме опорных спектров (расчетному спектру), то цифры, соответствующие этому интервалу, выделяются красным цветом. При несоответствии измеренного и расчетного спектров на экран выводится соответствующее предупреждение. Причиной такого отличия может быть как нарушение регламента измерений, так и наличие в счетном образце дополнительных радионуклидов или существенного сдвига радиоактивного равновесия в семействе тория между радием-228 и торием-228.

#### Нормативно-методическая документация

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99) СП 2.6.1.758-99. Минздрав России. 1999.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99) СП 2.6.1.799-99. Минздрав России. 2000.
3. Свод правил по инженерно-экологическим изысканиям для строительства СП 11-102-97.
4. Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий МУ 2.6.715-98. М. 1998.
5. Методика экспрессного измерения объемной активности радона в воздухе с помощью радиометра радона РРА-01-М-03. ГП ВНИИФТРИ. М. 1993.
6. Методика экспрессного измерения плотности потока радона с поверхности земли с помощью радиометра радона РРА-01М-03. ГП ВНИИФТРИ. М. 1993.
7. Методика измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с использованием программного обеспечения «Прогресс-2000».
8. Методика дозиметрического обследования территорий. МВК №46090.02. М. ВНИИФТРИ М. 2000.
9. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. СП 2.6.1.1292-2003.
10. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002) СП 2.6.6.1168-02. 2002.
11. Методические указания по проведению мониторинга естественных радионуклидов на нефтедобывающих предприятиях. Центр метрологии ионизирующих излучений ГП ВНИИФТРИ Госстандарта России.
12. Временные методические рекомендации по проведению пешеходной гамма-съемки. Казань. 2005.
13. Руководство по эксплуатации СРП-68.
14. Руководство по эксплуатации ДКГ-03Д «Грач».
15. Руководство по эксплуатации радиометра радона РРА-01 М-03.
16. Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий МУ 2.6.715-98. М. 1998.

Приложение

Форма протокола радиационного обследования зданий и помещений

(Наименование организации и лаборатории)

(№ Аттестата об аккредитации и срок его действия)

#### ПРОТОКОЛ

радиационного обследования № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Наименование объекта, его адрес: \_\_\_\_\_

Назначение объекта: \_\_\_\_\_

Цель обследования:

- ☒ приемка в эксплуатацию после завершения строительства;
- ☐ приемка в эксплуатацию после реконструкции;
- ☐ обследование эксплуатируемого здания.

Заказчик : \_\_\_\_\_

Проект здания (тип, серия) \_\_\_\_\_

Характеристика объекта:

Год постройки - \_\_\_\_\_ г. Количество этажей – \_\_\_\_\_. Тип фундамента – \_\_\_\_\_

Использованные строительные материалы – \_\_\_\_\_.

Содержание радия -226 (ЕРН) в стройматериалах \_\_\_\_\_ в засыпке \_\_\_\_\_.

Система вентиляции в здании: ☐ естественная, ☐ принудительная, ☒ кондиционирование.

Система вентиляции подвальных помещений: ☐ естественная, ☒ принудительная, ☐ кондиционирование.

### Средства измерения

№ п/п	Тип прибора	Заводской номер	№ свидетельства о госповерке	Срок действия свидетельства	Кем выдано	Основная погрешность
1	СРП-68-01					
2	ДКГ-03Д					
3	РРА-01М-03					

**Нормативно-методическая документация, использованная при проведении измерений:** МУ 2.6.1.715-98 «Проведение радиационно-гигиенического обследования жилых и общественных зданий», утверждены 24 августа 1998г. Главным Государственным санитарным врачом РФ; рекомендация ГСИ «Методика экспрессного измерения объемной активности  $R_n$  –222 в воздухе с помощью радиометра радона РРА-01М», согласована 10 июля 1998г директором ЦМИИ ГП «ВНИИФТРИ».

**Условия проведения измерений:**

Состояние принудительной вентиляции (кондиционеров):

Подвал: ☒ – штатный режим работы, ☐ – нештатный режим работы

Остальные помещения здания:

☐ – штатный режим работы, ☒ – нештатный режим работы (кондиционеры отключены)

☒ – окна, двери помещений и подъездов закрыты, ☐ – открыты.

Температура воздуха в помещениях \_\_\_\_\_ С °, вне здания \_\_\_\_\_ С °

Барометрическое давление \_\_\_\_\_

### Результаты измерений:

#### 1. МЭД внешнего гамма-излучения на открытой местности

№	Место измерения	Дата измерения	Значение $H_0$ , мкЗв/час	Погрешность измерения $\Delta_0$ мкЗв/ч
1				

Минимальное МЭД внешнего гамма-излучения на открытой местности,  $H_0 =$

#### 2. МЭД внешнего гамма-излучения в помещениях

№ п/п	Место измерения: этаж, № помещения, назначение	Дата измерения	Показания поискового прибора, мкР/ч	Результат измерен. Н, мкЗв/ч	Погрешн. $\Delta$ , мкЗв/ч	$H-H_0+\Delta_\Sigma$ , мкЗв/ч
1						

#### 3. ЭРОА изотопов радона в воздухе помещений

№ п/п	Место измерения, № помещения, назначение	Дата измерения	$^{222}\text{Rn}$ , Бк/м <sup>3</sup>		Максим. среднегодовая $C_{\max}$ , Бк/м <sup>3</sup>
			ОА	ЭРОА + $\Delta_{\text{Rn}}$	
1					

Использованный при расчете ЭРОА коэффициент равновесия  $F_{\text{Rn}} =$  \_\_\_\_.

Использованное при расчетах  $C_{\max}$  значение коэффициента вариации  $V_{\text{Rn}}(t) =$  \_\_\_\_

Приложение:

1. План помещений с фактическим материалом, М 1 : 100 - \_\_\_\_ листов

Измерения провел